

CAD-Methodik zur Produktivitätssteigerung in der Prozesskette Konstruktion-Fertigung

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik
der

Universität Duisburg-Essen

zur Erlangung des akademischen Grades

eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Marcin Waclaw Humpa

aus

Katowice (Kattowitz, Polen)

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Peter Köhler
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Norbert Müller

Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2016

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Rechnereinsatz in der Konstruktion an der Universität Duisburg-Essen. Die Inhalte wurden u. a. im Rahmen öffentlich geförderter Forschungsvorhaben erarbeitet, daher gilt ein großer Dank der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) sowie dem europäischen Fond für regionale Entwicklung und dem Land NRW (EFRE.NRW). Für den regen praxisorientierten Austausch gilt der Dank auch den in unterschiedlichen Projekten beteiligten industriellen Partnern.

Beim meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Math. Peter Köhler, möchte ich mich besonders für die wissenschaftliche Unterstützung bedanken. Als Mentor stand er mir über die Jahre jederzeit als wertvoller Ansprechpartner und Unterstützer meiner persönlichen und beruflichen Entwicklungen zur Seite.

Weiterhin danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Norbert Müller für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferates.

Für die ausgezeichnete Zusammenarbeit inner- und außerhalb der gemeinsam durchgeführten Projekte bedanke ich mich beim Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg, dem Inhaber des Lehrstuhls für Konstruktionslehre und Kunststoffmaschinen (KKM) und seinen Mitarbeitern. Für die gegenseitige Unterstützung und die stets offenen Türen gilt mein Dank besonders den ehemaligen Kollegen Dr.-Ing. Marius Janas und Dr.-Ing. Oliver te Heesen.

Für die angenehme Arbeitsatmosphäre, die zahlreichen fachlichen und fachübergreifenden Diskussionen und wertvollen Anregungen sowie die entgegengebrachte Unterstützung bei der gemeinsamen Verfolgung der fachlichen Ziele in den vielen Jahren der Zusammenarbeit danke ich meinen Büro- und Lehrstuhlkollegen: Dr.-Ing. Alexander Martha, Dr.-Ing. Christoph Kesselmanns, Dr.-Ing. Uwe Klemme, Dr.-Ing. Yousef Hooshmand, Thivakar Manoharan M. Sc., René Andrae M. Sc. und Ansgar Heinemann M. Sc.. Diese Umstände haben nicht nur zum Gelingen dieser Arbeit beigesteuert, es sind vielmehr Freundschaften entstanden, die hoffentlich trotz der jetzigen Entfernung noch lange erhalten bleiben.

Für die Unterstützung jeglicher Art über die Zeit bedanke ich mich vor allem bei meiner lieben und großen Familie: Eltern Barbara und Waclaw, Schwiegereltern Jolanta und Marcel, Großmutter Krystyna und Tante Lusia, Geschwistern Rafał, Magda und Maja, Schwägern Robert und Adam.

Nicht zuletzt gilt mein ganz besonderer Dank meiner liebsten Frau Monika und meinem Sohn Maximilian, die mir in den schwierigen Situationen immer das besondere Lächeln und somit den Rückhalt und ständige Motivation schenkten.

Liebe Familie, Euch allen widme ich diese Arbeit!

Inhaltverzeichnis

KURZFASSUNG.....	IX
ABSTRACT.....	X
1 EINLEITUNG	1
1.1 Problemschilderung und Motivation	2
1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	3
2 GRUNDLAGEN.....	7
2.1 Grundlagen der konventionellen Fertigung	7
2.1.1 Drehverfahren	9
2.1.2 Fräsverfahren	10
2.1.3 Bohrverfahren	13
2.2 Entwicklungs- und Konstruktionsprozess im Hinblick auf die Herstellkosten.....	14
2.2.1 Herstellkostenbeeinflussende Merkmale	14
2.2.2 Konstruktionsbegleitende Kalkulation (KBK)	18
2.2.2.1 Qualitative, konstruktiv orientierte KBK-Methoden	19
2.2.2.2 Quantitative, kalkulations-/kostenorientierte KBK-Methoden.....	19
2.2.3 Bedeutung der norm- und fertigungsgerechten Konstruktion	20
2.3 Strategische Möglichkeiten zur Beeinflussung der Produktivität.....	24
2.3.1 Betrachtung der Produktivität	24
2.3.2 Organisatorische und methodische Aspekte	25
2.3.3 Informations- und Wissensmanagement.....	27
2.3.4 PLM, SysLM und die 3D-Produktmodellierung	29
2.4 Technologien und Methoden des CAD- und CAM-Prozesses.....	33
2.4.1 KBE-Technologie	33
2.4.2 Feature-Technologie.....	35
2.4.2.1 Features und featurebasierte Modellierung.....	35
2.4.2.2 Feature-Erkennung und Feature-Transformation	37
2.4.3 Softwaretools zur Überprüfung der CAD-Modelle	38
2.4.4 Rechnergestützte Fertigung	41
2.4.5 CAD-CAM-Kopplung.....	42
2.5 Technologien und Methoden des Daten- und Informationsmanagements	44
2.5.1 Daten- und Informationsaustausch	44
2.5.1.1 STEP.....	45
2.5.1.2 JT	46
2.5.1.3 IGES.....	47
2.5.1.4 VDA-FS.....	48
2.5.1.5 XML	48
2.5.1.6 JSON	49

2.5.2	Datenbanksystem.....	50
2.5.2.1	Relationale Datenbank.....	51
2.5.2.2	Datenbanksprache SQL.....	52
2.5.2.3	Datenbanksystem MySQL.....	52
2.5.3	Informationstechnologien	53
2.5.3.1	Service-orientierte Architektur (SOA)	53
2.5.3.2	Webservice.....	55
3	BETRACHTUNG AUSGEWÄHLTER ASPEKTE DES CAD-CAM-PROZESSES	57
3.1	Vorbemerkung und Bauteilspektrum	57
3.2	CAD-Modellierungsmethodik und spanende Fertigung.....	62
3.2.1	Zerspanungskonforme CAD-Modelle	62
3.2.1.1	Abbilden der Zerspanungsgeometrie in 3D-CAD-Systemen	62
3.2.1.2	Beispiel Zylinderschnecke.....	64
3.2.1.3	Beispiel Wendelverteiler.....	66
3.2.1.4	Gestaltung der Bewegungshüllen in 3D-CAD-Systemen.....	68
3.2.2	Betrachtung der CAD-CAM-Features	69
3.2.2.1	Korrelation zwischen den CAD-und CAM-Features	69
3.2.2.2	Normgerechte und fertigungsorientierte CAD-Features	70
3.3	Fertigungsorientierte Geometrieanalyse der 3D-CAD-Daten.....	72
3.3.1	Bauteilanalyse mit PTC ModelCHECK.....	74
3.3.2	Bauteilanalyse mit DFMPPro	77
3.4	KBK-Methoden und die 3D-Produktmodellierung	81
3.5	Verfügbarkeit und Austausch der Daten, Informationen und des Wissens.....	83
4	WISSENSBASIERTE, NORM- UND FERTIGUNGSORIENTIERTE CAD-METHODEN	85
4.1	Geometrie des Schraubfräsens und ihre Abbildung im CAD-System	85
4.1.1	Strategie zur Beschreibung der Werkzeugwege in CAD-Systemen.....	85
4.1.1.1	Analytische Beschreibung der Werkzeugwege.....	86
4.1.1.2	Analytische Beschreibung der Werkzeugspurkurven	87
4.1.1.3	Kinematischer Ansatz zur Bestimmung der Werkzeugwege.....	92
4.1.2	Gestaltung der Bewegungshüllflächen im CAD-System	93
4.1.2.1	Werkzeugberandungsfläche.....	93
4.1.2.2	Werkzeugbodenfläche.....	94
4.1.2.3	Werkzeugauslauf.....	97
4.1.3	Beurteilung und Anwendbarkeit	97
4.2	Normgerechte und fertigungsorientierte Features.....	99
4.2.1.1	Featureabhängigkeiten und Entscheidungshilfen	99
4.2.1.2	Konzeptionierung und Aufbau der Features.....	101
4.3	Einbindung technologischer Fertigungsinformationen.....	105
4.3.1	Konzept der Wissenskopplung.....	105
4.3.2	Erschließung des strategischen Wissens	109
4.4	Zerspanungsgerechte Prüffunktionen zur Analyse der 3D-CAD-Modelle	111

5	CAD-METHODIK ZUR PRODUKTIVITÄTSSTEIGERUNG DES CAD-CAM-PROZESSES	115
5.1	Vorgehensmodell.....	115
5.2	CAD-Applikation und CAD-Umgebung mit implementierten Methoden.....	116
5.2.1	CAD-Applikation zur Gestaltung schraubgefräster Bauteile.....	116
5.2.2	CAD-Umgebung mit normgerechten und fertigungsorientierten Features.....	118
5.2.3	Normgerechte und fertigungsorientierte 3D-CAD-Modellanalyse.....	119
5.3	Wissensdatenbank und Webservice-Dienst	120
5.4	CAD-CAM-Kopplung auf Basis fertigungsorientierter Features	122
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	125
7	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	131
8	LITERATURVERZEICHNIS	135
	EIGENE PUBLIKATIONEN	147
	LEBENS LAUF	149

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ActiveX	Active Extension
API	Application Programming Interface
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CA	Computer Aided
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CFD	Computational Fluid Dynamics
COM	Component Object Model
DG	Digital Factory
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung
ERP	Enterprise Resource Planning
FEM	Finite Elemente Methode
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
JSON	JavaScript Object Notation
JT	Jupiter Tessellation
KBE	Knowledge-Based Engineering
KBK	Konstruktionsbegleitende Kalkulation
KE	Konstruktionselement
MKS	Mehrkörpersimulation
NC	Numerical Control
OOP	Objektorientierte Programmierung
PDM	Product Data Management
PEP	Produktentstehungsprozess
PLM	Product Lifecycle Management
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
STL	Surface Tessellation Language
SysLM	System Lifecycle Management
VB	Visual Basic
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VPE	Virtuelle Produktentwicklung
VPEP	Virtuelles Produktentwicklungsprozess
XML	Extensible Markup Language

Kurzfassung

Unstrittig ist, dass der Konstrukteur für die anforderungsgerechte Produktauslegung und Produktgestaltung verantwortlich ist und damit maßgeblich die Qualität und die Herstellkosten beeinflusst. Die Kompliziertheit und Komplexität der Konstruktionslösungen verhindert häufig eine angemessene Sichtweise auf die Herstellkosten bzw. auf Alternativen zur Herstellung eines Produktes. Die Kosten entstehen zumeist erst, wenn das Produkt durch die Fertigungsabteilung realisiert wird. Um dieser großen Kostenverantwortung der Konstruktion besser gerecht werden zu können, wird im Rahmen der Dissertation die technische Produktivität in der Prozesskette Konstruktion-Fertigung, welche sich über die Begriffe Effektivität und Effizienz ausdrücken lässt, betrachtet. Es werden Antworten auf die Fragen formuliert: Was kann getan werden, um die Produktivitätssteigerung in der heutigen Prozesskette Konstruktion-Fertigung zu erreichen?

Bei der Beantwortung dieser Frage werden CAD-Methoden vorgestellt, welche die Einbeziehung des Fertigungswissens in ein möglichst frühes Stadium des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses ermöglichen. Anhand von ausgewählten Problemfeldern für Bohr-, Dreh- und Fräsprozesse werden Lösungen zum zerspanungsorientierten Geometrieaufbau und der Fertigbarkeitsanalyse der 3D-CAD-Modelle aufgezeigt. Durch die Implementierung der Methoden und die Entwicklung einer speziellen, zerspanungsorientierten Umgebung im 3D-CAD-System wird dem Konstrukteur die Möglichkeit gegeben, den Produktmodellierungsprozess an Konstruktionsrichtlinien und projektspezifischen fertigungstechnischen und wirtschaftlichen Randbedingungen zu orientieren. Durch den Einsatz spezieller Methoden der wissensbasierten Konstruktion (KBE¹) und angepasster Web-Techniken (Webservice) werden die in einem fertigungsorientierten Form-Feature gebündelten, geometrischen Informationen um weitere technologische Parameter, wie Werkzeuge, Werkzeugparameter, Verfahrswege und notwendige Fertigungsvorgänge (wie z. B. Schruppen und Schlichten) ergänzt. Für komplexere Geometrieausprägungen werden flächenbasierte Modellierungsmethoden zur Gestaltung räumlicher und fertigungskonformer Werkzeugbewegungshüllen bereitgestellt. Diese insgesamt höherwertigen, fertigungsorientierten Features stellen die Basis für die konstruktionsbegleitende Kostenabschätzung und die CAD-CAM-Kopplung dar. Dabei werden die fertigungsrelevanten Daten und Informationen in der CAM-Umgebung extrahiert, sodass für jeden Fertigungsschritt die dafür benötigten Fertigungsoperationen auf einfache Weise abgeleitet werden können. Somit ergibt sich letztlich eine durchgängige Prozesskette zwischen der Konstruktion und Fertigung, welche auch die Qualität von CAD-CAM-Kopplungen erhöhen kann.

¹ KBE= Knowledge-based Engineering.

Abstract

It is indisputable that a design engineer is responsible for the requirement-driven functional and geometrical design of new products and that through this responsibility, has a significant impact on the associated quality and manufacturing costs. The complexity of the design solutions often prohibits an adequate assessment of the production costs and can make it difficult to consider alternative manufacturing methods. The manufacturing costs normally emerge only once the product is phased into production. In order to allow the design engineer to better fulfill this responsibility for product costs, this dissertation considers the technical productivity (expressed with the terms effectivity and efficiency) of the process chain between the design engineering and production departments. There are answers to the questions formulated: What can be done to achieve an improvement in the current process-chain between the design engineering and production departments?

In answering this question, CAD methods will be introduced which allow the inclusion of production knowledge into the earliest possible stages of the design and development process. Considering selected problem fields in the drilling, turning and milling processes, solutions for creating geometry through machining methods and for analyzing the producibility of 3D CAD models will be presented. Through the implementation of the methods and the development of a special machining-focused environment in the 3D CAD system, the design engineer will be given the ability to align the product modeling process with design guidelines and project-specific manufacturing and economic constraints. By using special methods of knowledge-based design engineering (KBE) and adapted web technologies (Webservice), the geometric information which is bundled in a production-focused form feature will be supplemented with additional technological parameters, such as tools, tool parameters, tool paths and necessary manufacturing operations (e.g. roughing and finishing). For more complex geometrical features, surface-based modeling methods for the design of three-dimensional and production compliant tool-movement envelopes will be provided. These increased-value, production-oriented features are the basis for the cost-estimation in the design phase and for the coupling of the CAD and CAM environments. As a result, the manufacturing-relevant data and information will be extracted by the CAM environment so that the production operations for each step can be determined in a simple manner. This approach results in a complete chain between the design engineering and production departments and can improve the quality of the CAD-CAM information exchange.

1 Einleitung

Die Begriffe der letzten Jahre, welche uns im ingenieurtechnischen und wirtschaftlich-technologischen Umfeld begegnen, sind u. a. Industrie 4.0 und Internet der Dinge. Diese bezeichnen einen Wandel, der nicht nur unser alltägliches Leben bereits verändert, sondern auch die Art und Weise, wie Produkte entwickelt und gefertigt werden sollen, denn in der nahen Zukunft wird alles zusammen vernetzt sein. Intelligenter, individueller, ressourceneffizienter, flexibler, schneller – für all das und manches mehr steht Industrie 4.0 [VD15]. Diese Zukunftsvision ist als ein Idealzustand zu betrachten und gibt eine richtungsgebende Orientierung für die anzustoßenden Veränderungen, und zwar nicht nur in den Bereichen der Produktion und des Services, sondern vor allem auch im Bereich der Produktentwicklung. Auch wenn weder der Zeitpunkt noch der Aufwand für die Umsetzung der Vision bekannt sind, wichtig ist, dass die Effektivität und Effizienz der Produktentwicklung kurzfristig erhöht wird, um dadurch den Weg für Industrie 4.0 zu bereiten [Se13a].

Die Realität des heutigen Produktentstehungsprozesses (PEP)², welche u. a. die virtuelle Produktentwicklung (VPE), die digitale Planung, die Fertigungs-/Montagesimulation und deren Visualisierung sowie das gemeinsame und umfassende Management aller auf das Produkt und die Produktionsplanung bezogenen Informationen in digitaler Form umfasst [EiSt09], ist vom Idealzustand noch um einige Schritte entfernt. Täglich kämpfen Produktentwickler und Konstrukteure darum, ihre Projekte im vorgegebenen Kosten- und Zeitrahmen und unter immer schwierigeren Bedingungen umzusetzen. Die Ursachen hierfür sind vielschichtig: voranschreitende Globalisierung der Märkte, die Produktkomplexität, weltweit verteilte Entwicklungsabteilungen, neue Gesetzesanforderungen oder Mangel an qualifiziertem Nachwuchs. Somit liegt es nahe, den heutigen PEP strategisch neu zu analysieren und zu überdenken. Denn hier legen die Ingenieure eine grundlegende Basis für eine dauerhafte Vernetzungs- und Kommunikationsmöglichkeit zwischen Prozessschritten, Systemen oder Geräten und zwar über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Auch hier werden die Konzepte und Techniken für den Daten-, Informations- und Wissensaustausch umgesetzt. Somit unterliegen die interdisziplinären Produktentstehungsmethoden zwangsläufig einem Wandel in Richtung Smart Engineering³, welches als fester Bestandteil der Industrie-4.0- und der Internet-der-Dinge-Strategie betrachtet werden sollte. Das Fundament hierfür bilden vor allem Forschung, Innovation, leistungsstarke Ingenieurwissenschaften und Innovationsnetzwerke aus Industrie und Wissenschaft. Die Aufgabe ist es jetzt, neue Möglichkeiten und Methoden zur Verbesserung der Prozessabläufe innerhalb des Produktentstehungsprozesses aufzuzeigen, um die vorhandenen methodischen und organisatorischen Ansätze zur Prozessoptimierung, CAE-Technologien, IT-Lösungen und PLM-Technologien strategisch sinnvoll zu verknüpfen und wirtschaftlich nutzbringend umzusetzen. Dabei spielt der CAD-CAM-Prozess innerhalb des PEPs eine große Rolle.

² Die Abkürzung PEP wird von manchen Autoren auch für die Bezeichnung des Produktentwicklungsprozesses verwendet, wobei der Begriff Produktentstehung auch nicht eindeutig definiert ist [SpKr97]. Teilweise betrifft er nur die Produktentwicklung, teilweise reicht er bis in die Produktion. [EiSt09].

³ Smart Engineering steht für interdisziplinäres, vernetztes, intelligentes, kluges Vorgehen in der Produktentwicklung, um attraktive Innovationen erfolgreich in zukünftigen intelligenten, vernetzten Produkten zu ermöglichen [AES12].

1.1 Problemschilderung und Motivation

Im Zuge des industriellen und technologischen Wandels hat sich auch die klassische Rolle des Konstrukteurs gewandelt. Er ist nach wie vor für die anforderungsgerechte Produktauslegung und -gestaltung verantwortlich. Aber neben der kreativen Tätigkeit kommen verstärkt die Aufgaben des Betreuens, des Verwaltens, Administrierens, Dokumentierens, Kommunizierens und Informierens auf ihn zu. Er soll stärker in den Planungs-, Beschaffungs- und Produktionsprozess involviert werden, um schon während des Entwurfs- und Konstruktionsprozesses immer mehr bewusste Entscheidungen treffen zu können und funktionierende Problemlösungen zu möglichst geringen Kosten zu entwickeln. Für die Bewertung der fertigungstechnischen Kostenauswirkungen dieser Entscheidungen stehen ihm in seiner Arbeitsumgebung, dem 3D-CAD-System, kaum Hilfsmittel zur Verfügung. Nicht selten ist der Entscheidungsprozess durch die Erfahrung des einzelnen Ingenieurs oder sogar seines Bauchgefühls geprägt. Angesichts der Tatsache, dass die Forschungs- und Entwicklungsabteilung zusammen mit der Konstruktion mit dieser Vorgehensweise ca. 70 % der späteren Produktkosten zu verantworten hat (vgl. Abb. 1-1), muss den Entwicklern und Konstrukteuren bei fertigungstechnischen Belangen konkret geholfen werden [Hi11].

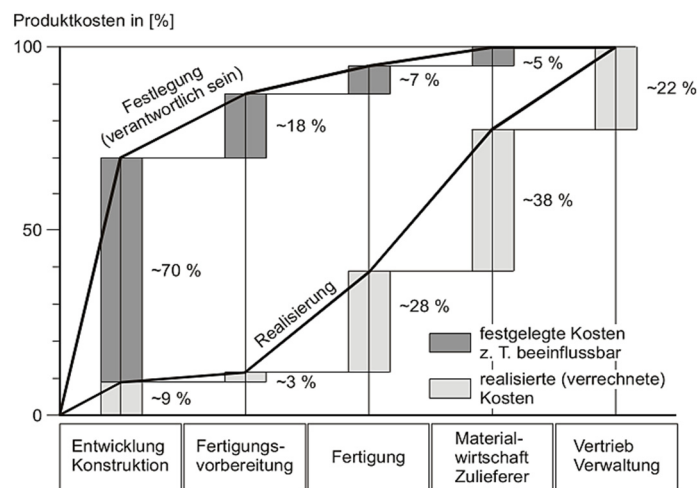


Abb. 1-1: Kostenfestlegung und Kostenentstehung [EKL14]

Die Entwicklung und Konstruktion sind als „Träger“ des Projektierungs- und des Entwicklungsprozesses anzusehen, wo die Produktkosten im Wesentlichen festgelegt werden. Diese Kosten seien zum Teil durch Entscheidungen beeinflussbar [EhMe13] und entstehen erst, wenn das Produkt produziert wird und durch die Abteilungen Fertigung und Einkauf realisiert werden [VDI2235] [EiSt09].

Die heutige Praxis zeigt, dass die betriebswirtschaftlichen Kenntnisse vieler Ingenieure in der Entwicklung und Konstruktion nicht der Kostenverantwortung dieser Abteilungen entsprechen [EKL14]. Oft scheitert die fertigungs- und kostenoptimale Konstruktion an den fehlenden Kostenzielvorgaben für Baugruppen und Einzelteile sowie mangelnder oder zu langsamer Rückkopplung von Konstruktion und Kostenauswirkung [Hi11]. Somit ist die Erzeugung eines Produktes wegen des fehlenden Wissens des Konstrukteurs oder fehlenden Informationen und Daten über die Fertigungsstrategien und Fertigungskosten nur durch aufwendige und somit sehr kostenintensive Verfahren möglich. Unabhängig davon, ob das Produkt nach dem Erkennen eines Fehlers umkonstruiert oder nach einem unwirtschaftlichen Fertigungsplan hergestellt wird, entstehen unerwünschte Kosten, welche zu minimieren und im besten Fall zu vermeiden sind. Um das realisieren zu können, benötigt die Entwicklungs- und Konstruktionsabteilung eine frühzeitige Kosteninformation, um die Kostenanalyse und Kostenkontrolle als festen Bestandteil des Konstruktionsprozesses zu etablieren.

[VDI2235]. Aus diesem Anspruch geht der Begriff der Kostenfrüherkennung in der Konstruktion hervor. Das methodische Mittel zur Erreichung der Kostentransparenz innerhalb der Prozesskette Konstruktion-Fertigung ist die konstruktionsbegleitende Kalkulation (KBK) [Hi11].

Seit Jahren werden verschiedene Ansätze und Methoden zur konstruktionsbegleitenden Kostenkalkulation bzw. Kostenabschätzung entwickelt, um die Kostenfrüherkennung in der Konstruktion zu realisieren (vgl. auch Abschnitt 2.2.2). Obwohl eine Vielzahl von KBK-Methoden seit Jahren existiert und auch in der Praxis angewandt wird, ist der Bedarf der heutigen Konstrukteure nur zu einem geringen Teil des gewünschten Umfangs erfüllt [Mö11]. Das ist auf die immer noch zu mangelhaft ausgeprägte Kopplung der bisherigen, allgemeinen Konstruktionsmethodik und CAD-Technologie zurückzuführen. Erst langsam entwickelt sich eine rechnerspezifische Konstruktionsmethodik [EhMe13], welche im Rahmen dieser Arbeit auch als CAD-Methodik bezeichnet wird. Betrachtet man die leistungsstärksten 3D-CAD-Systeme, wie z. B. Creo, CATIA oder NX, sind die KBK-Methoden in den Systemen standardmäßig nicht implementiert. Es existieren jedoch indirekte Lösungen in Form von Beziehungs- und Regeleditoren, standardisierten, firmenspezifischen Konstruktionselementen (KEs), benutzerdefinierten Features, Start- und Mastermodellen, Konfigurations- und Austauschbaugruppen, welche hinsichtlich der geforderten/gewünschten Anforderungen (wie z. B. funktionsgerecht, normgerecht, belastungsgerecht, fertigungsgerecht oder montagegerecht) dem Konstrukteur zur Verfügung gestellt werden können. Somit besteht an dieser Stelle ein Handlungsbedarf, mit dem Ziel der Entwicklung einer CAD-Methodik, welche mit der KBK-Methodik korrespondiert. Dabei fordert der heutige, virtuelle PEP mit seinem zentralen 3D-Produktmodell eine besondere Betrachtung der qualitativen (konstruktiv-orientierten) KBK-Methoden. Es soll nicht nur die Übertragbarkeit des Wissens durch die Wissenstransformation und Wissensformalisierung gewährleistet werden, sondern auch eine geeignete Art der Bereitstellung des Wissens (Wissens-transfer) für den Konstrukteur berücksichtigt werden, um die Absicherung der Anwendbarkeit der quantitativen (kalkulations-/kostenorientierten) KBK-Methoden auf das 3D-Produktmodell gewährleisten zu können. Dazu sind neue bzw. verbesserte rechnerunterstützte Strategien, Methoden, Werkzeuge und Hilfsmittel gefragt, welche den Konstrukteuren während des Entwurfs- und Konstruktionsprozesses helfen, immer mehr bewusste, funktions-, und fertigungsoptimale Entscheidungen zu treffen und anforderungsgerechte Lösungen zu möglichst geringen Kosten zu entwickeln.

1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Die Absicht ist, alle in der Prozesskette Konstruktion-Fertigung beteiligten Personen, wie

- Projektingenieure (als in vielen Fällen die bestimmende Person für neue Aufgabenstellungen und Konzepte),
- Entwicklungskonstrukteure (als die Verantwortlichen für funktionsgerechtes und kostengünstiges Konzept und Gestalt des Produktes),
- Konstruktionsleiter (als die Verantwortlichen für die Einführung von Methoden und Hilfsmitteln zur Kostenbeeinflussung der Produkte in der Konstruktion und als Mitverantwortliche für die Formulierung unternehmensspezifischer Konstruktionsmethoden und -standards),
- Detailkonstrukteure (als die Verantwortlichen für die kostengünstige, fertigungs- und normgerechte Gestaltung)

am Beispiel spanend herzustellender Produktausprägungen auf ausgewählte Probleme aufmerksam zu machen und zu sensibilisieren.

Es soll das Verständnis für wirtschaftliche Zusammenhänge zwischen dem Konstruierten und dem Gefertigten geweckt werden, um die Herstellzeiten und -kosten bereits während des Konstruktionsprozesses besser berücksichtigen zu können. Es werden beispielhafte Handlungsempfehlungen auf konstruktiver Detailebene sowie auf strategischer Ebene erarbeitet, welche die Rahmenbedingungen für fertigungsoptimale Konstruktionen begünstigen sollen. Dazu gehören Methoden:

- zur Gestaltung normgerechter und fertigungsorientierter 3D-CAD-Modelle,
- zur Unterstützung der Modellanalyse und Modelloptimierung hinsichtlich der Norm- und Fertigungsgerechtigkeit,
- zur Integration von Fertigungsinformationen in den Konstruktionsprozess,
- zur durchgängigen CAD-CAM-Kopplung und damit zur Beschleunigung der Prozessabläufe,
- zur verlustfreien Datenübergabe an weitere Methoden oder Systeme (wie z. B. Kostenabschätzungs- und Kostenkalkulationsmethoden oder Optimierungssysteme) über eine definierte Schnittstelle,
- um den in den Prozessen beteiligten Personen eine Hilfestellung beim Treffen von Entscheidungen zu ermöglichen,
- um den gemeinsamen Zugriff auf alle organisationsinternen und -übergreifenden sowie global verteilten Informationen zu gewährleisten und damit eine hohe Qualität des 3D-Produktdatenmodells abzusichern.

Von besonderer Bedeutung sind hier qualifizierende CAD-Methoden und -Tools, welche dem Konstrukteur beim Aufbau normgerechter und fertigungsorientierter 3D-CAD-Modelle unterstützen sollen, um nicht nur der Funktion des geplanten Produktes gerecht zu werden, sondern auch Aspekten der wirtschaftlichen Fertigung. Hierbei sind insbesondere zwei Anwendungsszenarien hervorzuheben, zum einen eine von vornherein featurebasierte Modellierung mithilfe der normgerechten und fertigungskonformen CAD-Features und zum anderen die Unterstützung der Modellanalyse und Modelloptimierung hinsichtlich der Fertigungsgerechtigkeit.

Die Integration der neuen Methoden und Tools in die 3D-CAD-Arbeitsumgebung soll dem Konstrukteur helfen, schon während der Entwicklungs- und Konstruktionsphase immer mehr bewusste herstellkostenbeeinflussende Entscheidungen treffen zu können. Um das zu realisieren, ist nicht nur eine Kopplung der Geometriedaten mit den quantitativen Herstellkosten/-zeiten basierenden Kalkulationsverfahren notwendig, sondern auch eine Strategie zur Wissenstransformation, Wissensformalisierung und dem Wissenstransfer zwischen der Fertigung und Konstruktion.

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Strategien und die CAD-basierten Methoden zielen auf die Steigerung der Produktivität – jedoch ohne detaillierte Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und Rentabilität der CAD-CAM-Prozessschritte.

Nach dieser kurzen Einleitung in die Thematik werden im Kapitel 2 alle für diese Arbeit relevanten Grundlagen dargestellt. Diskutiert werden hier die technologischen Aspekte der konventionellen Fertigungsverfahren, der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess im Hinblick auf die Herstellkosten und die strategischen Möglichkeiten zur Beeinflussung der Produktivität in der Prozesskette Konstruktion-Fertigung mit den dazugehörigen Technologien und Methoden des CAD- und CAM-Prozesses sowie des Daten- und Informationsmanagements. Basierend auf einem vorausgewählten Bauteilspektrum folgt im Kapitel 3 eine Betrachtung ausgewählter Aspekte des CAD-CAM-Prozesses. Die Schwerpunkte der Analyse bilden vor allem die Themen der CAD-Modellierungsmethodik und

Geometrieanalyse im Zusammenhang mit spanender Fertigung, der konstruktionsbegleitenden Kostenanalyse während der 3D-Produktmodellierung sowie der Verfügbarkeit und des Austausches von Daten, Informationen und Wissen. Kapitel 4 stellt die erarbeiteten wissensbasierten und fertigungsorientierten CAD-Methoden als Antwort auf die Analyse der Problemfelder aus Kapitel 3 dar. Die entwickelten fertigungsorientierten 3D-Modellierungsmethoden, ergänzt um norm- und fertigungsorientierte Features und zerspanungsgerechte Prüffunktionen zur Analyse der 3D-CAD-Modelle sowie die Strategie zur Einbindung technologischer Fertigungsinformationen in der frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses stellen letztlich die Grundlage für die im Kapitel 5 vorgestellte und beispielhaft umgesetzte CAD-Methodik zur Produktivitätssteigerung des CAD-CAM-Prozesses dar. Die Arbeit wird schließlich mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick im Kapitel 6 abgeschlossen.

2 Grundlagen

2.1 Grundlagen der konventionellen Fertigung

Unter dem Begriff der konventionellen Fertigung werden in dieser Arbeit die Fertigungsverfahren: Fräsen, Drehen und Bohren nach DIN-Norm [DIN8580], [DIN8580] und [DIN8589] verstanden. Diese Verfahren gehören zu der Fertigungsverfahrenshauptgruppe Trennen (vgl. Abb. 2-1). Unter dem Begriff Trennen wird im Allgemeinen das Fertigen durch das Ändern der Form eines festen Körpers verstanden, wobei die Endform in der Ausgangsform enthalten ist (subtraktives Verfahren). Um die gewünschte Geometrie zu erzeugen, können verschiedene Arten von Fertigungsverfahren vom Zerteilen bis zum Zerlegen angewandt werden. Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide ist eine Untergruppe dieser trennenden Fertigungsverfahren, bei denen die Form durch das Abtragen von überflüssigem Werkstoff in Form von Spänen erzeugt wird. Im Gegensatz zum Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide wird beim Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide, welche in dieser Arbeit betrachtet wird, ein Werkzeug eingesetzt, dessen Schneidzahl sowie die Geometrie der Schneidkeile und die Lage der Schneiden zum Werkstück eindeutig bestimmt sind.

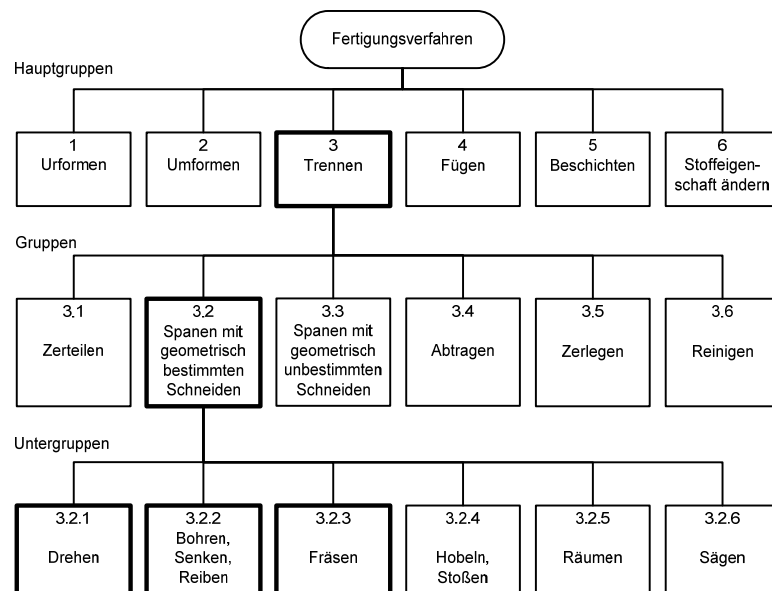


Abb. 2-1: Unterteilung der Fertigungsverfahren nach [DIN8589]

Die spanende Bearbeitung (auch zerspanende Bearbeitung genannt) nimmt unter den trennenden Fertigungsverfahren eine dominierende Stellung ein, da die Anwendungsmöglichkeiten vielfältig sind. Zu den Merkmalen der spanenden Fertigungsverfahren gehören nach [GEB14]:

- eine hohe Fertigungsgenauigkeit,
- eine hohe Universalität der erzeugbaren Formen,
- eine gute Automatisierbarkeit,
- hohe Reproduzierbarkeit der Qualität,
- wirtschaftliche Anpassungsfähigkeit,
- nahezu geometrisch unbegrenzte Bearbeitungsmöglichkeiten und kaum Beschränkungen in der Werkstoffauswahl.

Die Zerspanungstechnologien zeichnen sich durch eine eindeutige Definition ihrer Grundbegriffe und der dazugehörigen Basisgrößen aus, welche in der DIN-Norm [DIN6580] definiert sind. Der Schwerpunkt wird auf die eindeutige Benennung der Bewegungen und der Geometrie des Zerspanvorganges gelegt. Die relevanten Basisgrößen sind in der Abb. 2-2 dargestellt.

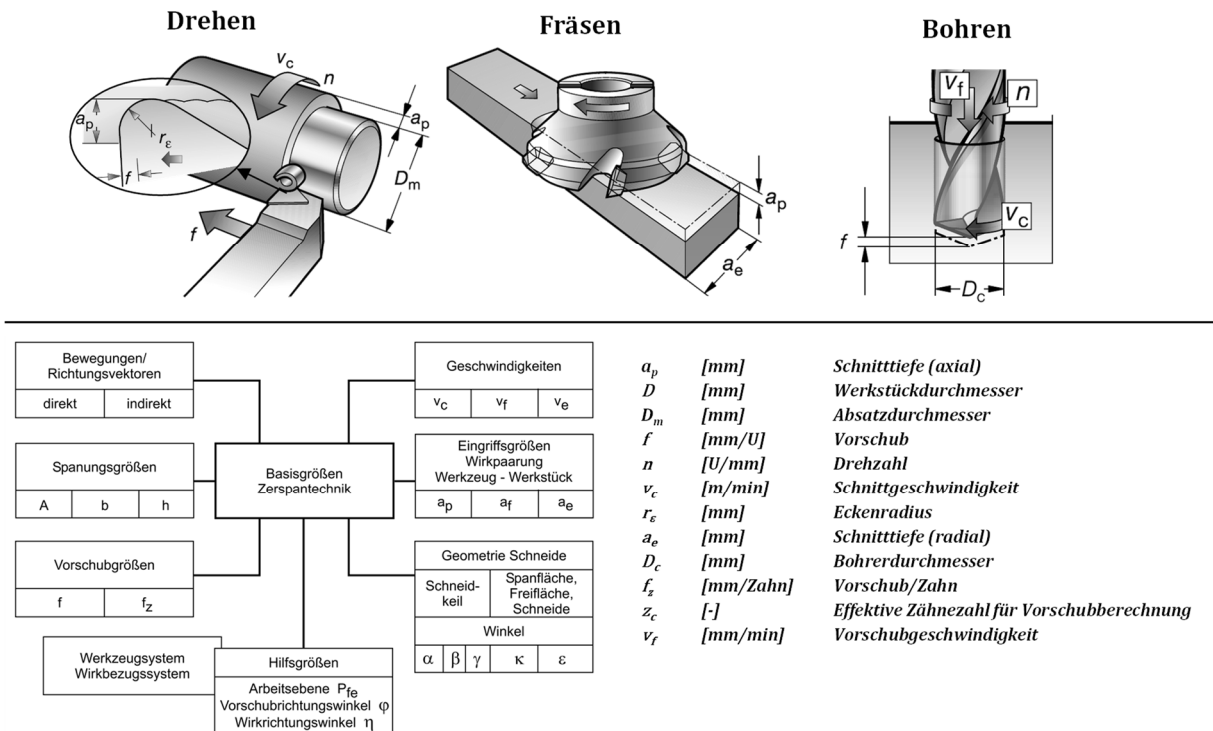


Abb. 2-2: Basisgrößen der Zerspantechnik nach [Aw07], [Sa11a] und [DIN6580]

Die Bestimmung der Fertigungsparameter, welche den Einfluss auf die erreichbare Oberflächengüte und Toleranz haben, richtet sich stark nach den verwendeten Bearbeitungsschritten und den Grundsätzen der konventionellen Fertigungstechnik sowie dem Fertigungswissen des Fertigungsexperten. Im Allgemeinen gelten beispielsweise folgende Aussagen:

- die Wahl der Schnittgeschwindigkeit v_c erfolgt vorrangig nach:
 - dem Werkstoff des Werkzeugs (Schneidstoff): je härter, desto höher ist v_c ,
 - dem Werkstoff des Werkstücks: je härter, desto niedriger ist v_c ,
 - der Art der Zerspanung: bei Grobbearbeitung ist v_c niedriger als bei Feinbearbeitung,
 - der Kühlschmierung: mit Kühlschmierung kann v_c höher als ohne gewählt werden.
- der Vorschub pro Umdrehung f bzw. je Zahn f_z ist in erster Linie abhängig von:
 - der gewünschten Oberflächenqualität: je kleiner der Vorschub, desto besser die Oberflächenqualität,
 - der Art der Zerspanung: bei Grobbearbeitung wird der Vorschub größer gewählt. Dadurch nimmt die Vorschubgeschwindigkeit zu und die Fertigungszeit ab,
 - dem Werkstoff des Werkstücks: je härter, desto niedriger f bzw. f_z ,
 - dem Werkstoff des Schneidstoffs: je härter, desto höher f bzw. f_z .

Im Folgenden wird auf die für diese Arbeit relevanten Fertigungsverfahren (Drehen, Bohren und Fräsen) eingegangen. Die Grundlage für die Unterteilung der einzelnen Verfahren bildet die Art der zu erzeugenden Flächen (Plan-, Rund-, Schraub-, Profil-, Form- und Wälzfläche).

2.1.1 Drehverfahren

Nach DIN-Norm [DIN8589] ist Drehen als Spanen mit geschlossener, meist kreisförmiger Schnittbewegung und beliebiger, quer zur Schnitttrichtung liegender Vorschubbewegung definiert. Die Drehachse der Schnittbewegung ist hierbei werkstückgebunden, unabhängig davon, ob die Drehbewegung vom Werkstück oder vom Werkzeug ausgeführt wird.

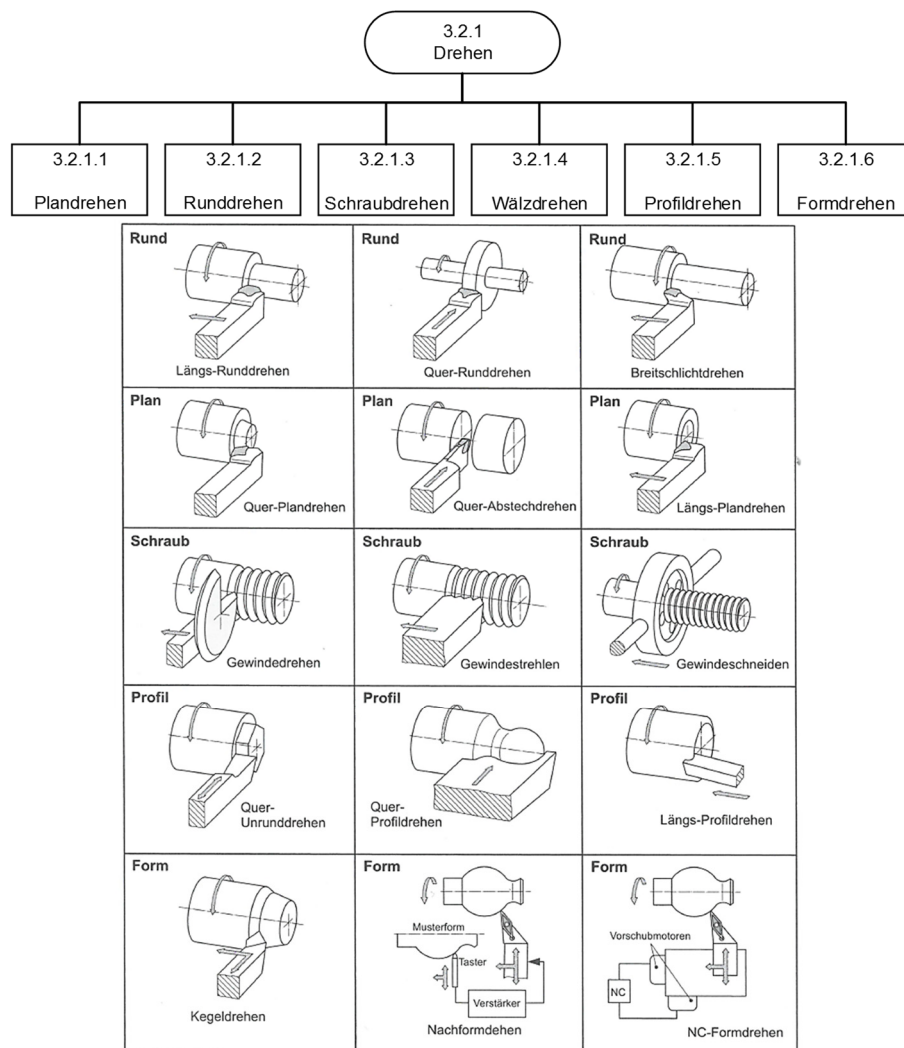


Abb. 2-3: Unterteilung der Drehverfahren nach [WiDü06]

Für die Erzeugung einer senkrecht zur Drehachse liegenden, ebenen Fläche werden zumeist die Drehverfahren Quer-Plandrehen, Quer-Abstechdrehen und Längs-Plandrehen eingesetzt (vgl. Abb. 2-3). Die drei Verfahren unterscheiden sich in der Vorschubrichtung (Quer- oder Längsanordnung in Bezug auf die Drehachse des Werkstückes), in der Art des eingesetzten Werkzeuges sowie im Einsatzzweck. Das Quer- und das Längs-Plandrehen werden eingesetzt, um eine ebene Fläche zu erzeugen. Dabei wird die Schneide des Drehmeißels beim Längs-Plandrehen mindestens so breit ausgewählt wie die am Werkstück entstehende ringförmige, ebene Fläche. Das Längs-Abstechdrehen

dient vorwiegend dazu, Werkstückteile voneinander zu trennen. Um den Materialverlust gering zu halten werden hierbei möglichst schmale Werkzeuge bevorzugt [KlKö08].

Bei dem sogenannten Runddrehen wird mittels Spanen eine zur Drehachse des Werkstückes koaxial liegende, zylindrische Fläche erzeugt. Der Anwendungsbereich vom Runddrehverfahren geht von der Feinbearbeitung kleiner Teile bis hin zur Schwerzerspanung von Antriebswellen im Anlagenbau. Zu den wichtigsten Runddrehverfahren gehören nach [KlKö08] das Schäldrehen sowie das Längs-Runddrehen.

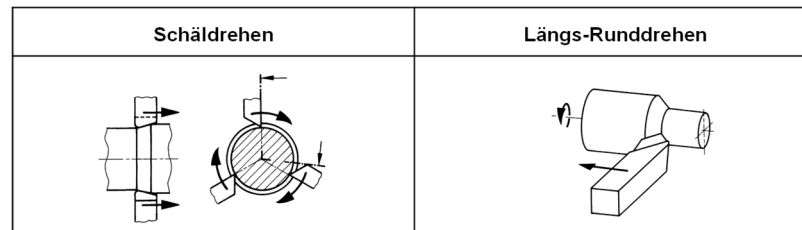


Abb. 2-4: Verfahrensvarianten zur Erzeugung runder Flächen nach [DIN8589]

Hauptsächliches Unterscheidungsmerkmal beider Verfahren ist die Kinematik von Rotations- und Vorschubbewegung und die Anzahl der sich im Eingriff befindlichen Werkzeugschneiden. Beim Längs-Runddrehen dreht sich das Werkstück und das Werkzeug führt die Vorschubbewegung aus. Beim Schäldrehen wird die Rotationsbewegung über das Werkzeug und die Vorschubbewegung über das Werkstück umgesetzt. Hier befinden sich im Gegensatz zum Längs-Runddrehen mehrere Schneiden im Eingriff. Die Werkzeugkinematik und die Werkzeuggeometrie führen nach [KlKö08] dazu, dass mithilfe des Schäldrehens im Vergleich zum Längs-Runddrehen ein höheres Zeitspanungsvolumen, eine höhere Oberflächengüte und eine zusätzliche Stabilisierung des Werkstücks durch das umlaufende Werkzeug erreicht werden können. Obwohl das Längs-Runddrehen die am weitesten verbreitete Drehverfahrensvariante ist, ist das Schäldrehen nach [KlKö08] produktiver und ermöglicht eine höhere Oberflächengüte.

Um die Bearbeitungsschritte mit den dazugehörigen Basisgrößen für einen Drehprozess auszulegen, kann die VDI-Richtlinie [VDI3206] herangezogen werden. Diese enthält sehr wichtige Hinweise im Hinblick auf die Arbeitsvorbereitung und Konstruktion. Dort wird beispielsweise auf den Einsatz von Zentrierspitzen und Zentrierbohrungen während der Drehbearbeitung von sehr langen dünnen Bauteilen hingewiesen, um die Bauteile zu stützen. Auch Strategien zur Wahl des Werkzeugs, der Bearbeitungsschritte und Prozessparameter, welche die Ergebnisqualität beeinflussen, werden diskutiert.

2.1.2 Fräsverfahren

Nach DIN-Norm [DIN8589] ist das Fräsen als Spanen mittels kreisförmiger Schnittbewegung mit einem meist mehrzahnigen Werkzeug definiert. Im Gegensatz zum Drehen wird beim Fräsen das Werkzeug, und nur bei bestimmten Verfahren das Werkstück, in eine rotatorische Bewegung versetzt. Die Anwendungsmöglichkeiten sind somit nicht auf rotationssymmetrische Bauteile beschränkt, wodurch nach [KPP12] eine erhöhte Einsatzflexibilität entsteht. Der Vorschub kann beliebig senkrecht und/oder schräg zur Schnittbewegung erfolgen.

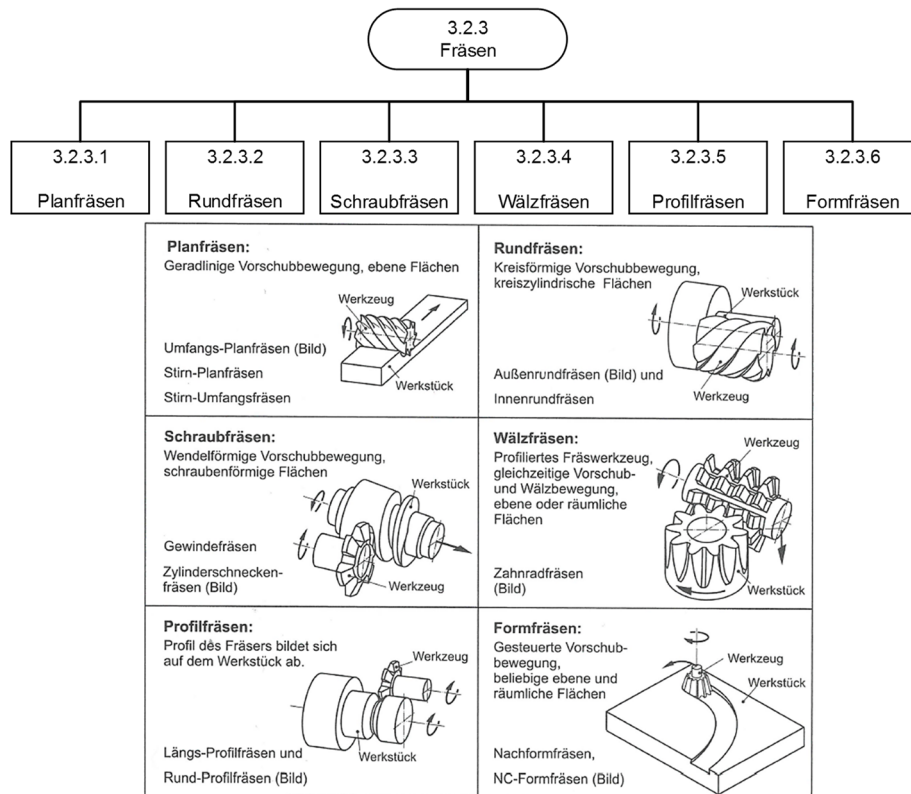


Abb. 2-5: Unterteilung der Fräsverfahren nach [WiDü06]

Plan-Fräsen dient der Erzeugung ebener Flächen mit einer geradlinigen Vorschubbewegung und ist nach [KIKö08] das am häufigsten angewandte Fräsverfahren.

Das Rundfräsen dient der Fertigung kreiszylindrischer Flächen, sowohl mit außen- als auch innenverzahnten Fräsern. Die Werkzeug- und Werkstückdrehachse liegen beim Rundfräsen üblicherweise parallel zueinander (paralleles Drehfräsen), hierbei stellt die Ausnahme das Stirn-Umfräsen mit orthogonal zueinander liegender Werkzeug- und Werkstückachse dar. Dieses Verfahren wird im Allgemeinen auch als orthogonales Drehfräsen bezeichnet und hat sich zu einer wirtschaftlichen Alternative zum Drehen entwickelt [FrSc06]. Drehfräsen mit kleiner Fräserbewegung in Richtung der Werkstückachse wird z. B. auch zur Erzeugung von Wellenabsätzen eingesetzt. Gegenüber dem Runddrehverfahren liegen die Vorteile des Drehfräsens in einem sichereren Spanbruch, höherer Zerspanleistung und geringeren Werkstückdrehzahlen, was vor allem bei massiven Bauteilen eine Rolle spielt [PHL08]. Die werkstückaxiale Fräserbewegung hat aufgrund des rotierenden Bauteils einen wendelförmigen Vorschub zur Folge. Ist diese Bewegung in Richtung der Werkstückachse größer als die erzeugte Schnittbreite pro Umdrehung des Werkstückes, wird Schraubgeometrie erzeugt. In diesem Fall wird das Drehfräsen dem Schraubfräsen zugeordnet [PHL08], [KIKö08]. Aus Fertigungssicht ist diese umlaufende Werkstückbearbeitung entweder durch dreiachsige Maschinen realisierbar, die über einen weiteren Ausbau eine vierte oder fünfte Maschinenachse erhalten oder durch herkömmliche vier- bzw. fünfachsiges Maschinen. Die 4- und 5-Achs-Maschinen unterscheiden sich von der dreiachsigen Variante durch eine bzw. zwei zusätzliche Schwenk- oder Drehachsen neben den drei linearen Achsen [KiRo13] [Bö13].

Ein besonders interessantes Verfahren, welches mehreren Varianten zugeordnet werden kann, ist das in Abb. 2-6 und Abb. 2-7 dargestellte und nachfolgend als orthogonales Drehfräsen mit programmierbarer Vorschubbewegung bezeichnete Verfahren. Neben der Zuordnung zum orthogonalen

Drehfräsen kann dieses Verfahren aufgrund seines werkstückgebundenen Fräswerkzeuges und wegen der Kombination aus Fräs- und Drehbearbeitung auch dem Profilfräsen oder dem Profildrehen zugeordnet werden.

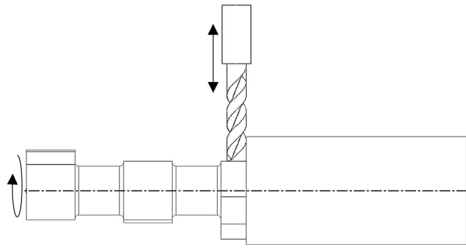


Abb. 2-6: CNC-Drehfräsen einer Nockenwelle

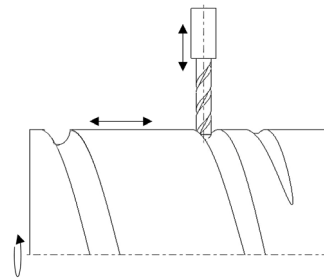


Abb. 2-7: CNC-Drehfräsen Wendelnut

Eine Unterscheidung der Varianten des orthogonalen DrehfräSENS mit programmierbarer Vorschubbewegung kann anhand der Fräserbewegung erfolgen. Zum einen kann diese auf die Richtung der Werkzeugachse beschränkt werden, was die Fertigung von exzentrischen Bauteilen wie Kurbel- oder Nockenwellen ermöglicht (siehe Abb. 2-6). Hierbei erfolgt eine elektronische Kopplung von Fräserbewegung in Werkzeugachsenrichtung und Rotationsbewegung des Bauteils, um so die Pleuellagerstellen bzw. die Nocken zu erzeugen. Zum anderen gibt es Maschinen, welche das Programmieren einer Fräserbewegung sowohl in Werkzeugachs- als auch in Werkstückachsrichtung erlauben, wodurch das Fertigen von Schneckenengeometrie wie z. B. bei Extruderschnecken für die Kunststoffverarbeitung ermöglicht wird (siehe Abb. 2-7).

Nach [KlKö08] werden auch die verschiedenen Fräsverfahren in der Praxis häufig nach den zugehörigen Werkzeugen benannt. Dies belegt den großen Einfluss der Werkzeugart auf das erfolgreiche Erzeugen von Bauteilen mittels Fräsverfahren. Die Einteilung von Fräswerkzeugen nach einheitlichen Gesichtspunkten ist nach [FrSc06] jedoch schwierig. Es kann, abhängig von dem Wirkprofil sowie der Wirkfläche, zwischen vier grundsätzlichen Fräswerkzeugtypen unterschieden werden: Umfangsfräser, Stirnfräser, Profilfräser und Formfräser (siehe Tabelle 2-1).

Tabelle 2-1: Einordnung Fräswerkzeuge nach [FrSc06]

Fräsertyp	Wirkprofil	Wirkfläche	Beispiele		
Umfangs- (walzen-) Fräser	werkstück- ungebunden	Umfangsfläche (kreiszyklindrisch)	Walzenfräser		
Stirnfräser	Werkstück- ungebunden	Seiten (-Stirn)- & Umfangsflächen	Walzenstirn- fräser	Schaftfräser	Messerkopf
Profilfräser	werkstück- gebunden	Profilfläche	Halbkreisfräser	Prismenfräser	Scheibenfräser
Formfräser	werkstück- ungebunden	Formfläche beliebig	Gesenkfräser		

Ein wichtiges Hilfsmittel für die Betrachtung der verschiedenen Fräsprozesse stellt die Reihe der VDI-Richtlinien [VDI5211] dar. Die [VDI/NCG5211-1] dient beispielsweise als Prüfrichtlinie zur Verifikation der Fertigungsgenauigkeit bei 3-Achs-Fräsmaschinen. Sie enthält beispielhaft

vordefinierte Fertigungsgeometrie, welche von einer 3-Achs-Fräsmaschine realisierbar ist. Zusätzlich werden hier bereits eine optimale Bearbeitungsreihenfolge und eine Liste benötigter Werkzeuge angegeben.

2.1.3 Bohrverfahren

Die Definition des konventionellen Bohrens nach DIN-Norm [DIN8589] ist das Spanen mittels kreisförmiger Schnittbewegung mit identischer Werkzeug- und Innenflächenachse und einem Vorschub, der ausschließlich in Richtung dieser Achse verläuft. Die Drehachse der Schnittbewegung behält hierbei unabhängig von der Vorschubbewegung ihre Lage zum Werkstück bei und wird aus diesem Grund als werkstückgebunden definiert. Neben dem konventionellen Bohren werden unter der Untergruppe 3.2.2 der Fertigungsverfahren nach DIN-Norm [DIN8589] ebenfalls die Verfahren Senken und Reiben aufgeführt. Beide Verfahren dienen dem nachträglichen Bearbeiten der erzeugten Bohrung. Senken ist das Erzeugen von senkrecht zur Drehachse liegenden Plan- oder von rotationssymmetrischen Form- bzw. Kegelflächen. Reiben dient der Erhöhung der Oberflächengüte durch Aufbohren mit geringen Spannungsdicken. Die Unterteilung der Bohrverfahren erfolgt, wie auch bei den Fräs- und Drehverfahren, nach der zu erzeugenden Fläche in Plansenken, Rund-, Schraub-, Profil- und Formbohren (siehe Abb. 2-8).

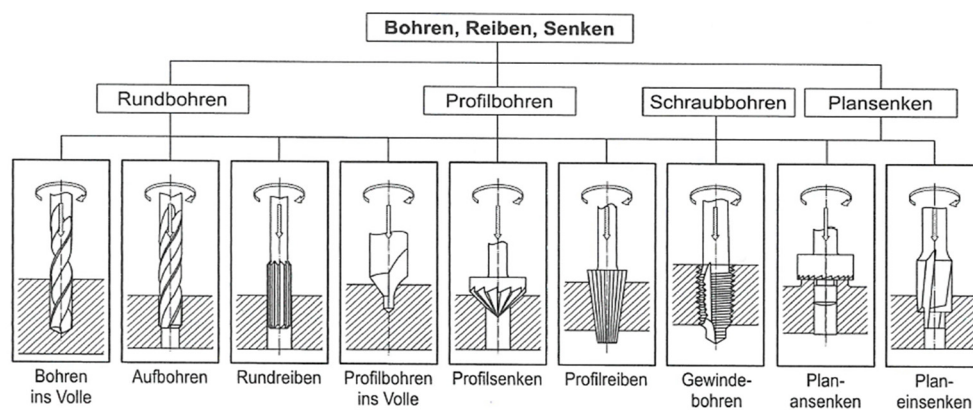






Abb. 2-8: Unterteilung der Bohrverfahren [WiDü06]

Die am weitesten verbreitete und kostengünstigste Verfahrensvariante stellt das Bohren ins Volle mit symmetrisch angeordneten Hauptschneiden [PHL08]. Zu dem wesentlichen Vorteil symmetrisch angeordneter Schneiden gehört die Tatsache, dass während des Bohrprozesses auf weitere Stütz- bzw. Führungsmaßnahmen verzichtet werden kann, da die Schneidkräfte einander ausgleichen, wodurch eine Selbstführung des Bohrers ermöglicht wird. Das wichtigste Werkzeug für die Bohrungserzeugung aus dem vollen Material sind die sog. Wendelbohrer (Spiralbohrer), deren wichtigste Varianten mit den dazugehörigen Merkmalen und Kennwerten in der Tabelle 2-2 dargestellt sind.

Tabelle 2-2: Werkstoffe und Kenndaten von Wendelbohrern nach [KPP12]

	HSS-Bohrer 	Gelötete Hartmetall-Bohrer 	Voll-Hartmetall-Bohrer 	Hartmetall-Wendeschneidplatten 
Bohrerdurchmesser [mm]	0,5...12	9,5...30	3...20	12...60
Bohrungstiefe	2...6 x D	3...5 x D	2...5 x D	2...4 x D
Oberflächengüte R_z	3 μm	1...2 μm	1...2 μm	1...5 μm
Bohrungstoleranz	IT 10	IT 8-10	IT 8-10	+0,4 / -0,1
Stahl	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Stahl, gehärtet	möglich	sehr gut	gut	sehr gut
Stahl, rostfrei	gut	gut	möglich	sehr gut
Grauguss	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Al-Legierung	gut	gut	gut	sehr gut

Der eingesetzte Werkstoff ist nach [PHL08] häufig ausschließlich Schnellarbeitsstahl (HSS). Je nach Anwendungszweck kann zur Kostenersparnis auch einfacher Werkzeugstahl oder ein Schweißverbund aus verschiedenen Werkstoffen eingesetzt werden.

Die Vorteile beim Einsatz von Wendelbohrern sind nach [PHL08] vor allem die Kostenersparnis durch die geringen Anschaffungskosten und die gute Haltbarkeit. Nachteilig hingegen wirkt sich das schwierige Zentrieren beim Anbohren durch die fehlende Führung zu Beginn, die eingeschränkte Bohrungsqualität und das große Schnittmoment aufgrund hoher Reibungskräfte der Führungsnuten aus. Die flexiblen Einsatzbereiche sind vor allem durch die Vielzahl von Varianten an Wendelbohrern bedingt. Die optimale Auswahl erfolgt nach [KPP12] anhand verschiedenster Aspekte, wie Art des Werkstoffes, geforderte Bohroberflächenqualität, Wirtschaftlichkeit und Werkzeugbedingungen (vgl. Tabelle 2-2). Die Form und die Steigung der Bohrschneiden hingegen richten sich nur nach dem zu bearbeitenden Material.

2.2 Entwicklungs- und Konstruktionsprozess im Hinblick auf die Herstellkosten

2.2.1 Herstellkostenbeeinflussende Merkmale

Das wesentliche Ziel eines Unternehmens ist die Erwirtschaftung eines möglichst hohen Gewinns, welcher durch die Erhöhung des Erlöses für die Produkte und die Senkung der Kosten für die Produkterstellung erreicht werden kann. Um Kosten effektiv senken zu können, gibt es nach EHRENSPIEL [EhMe13] zwei grundsätzliche Wege (vgl. auch Abb. 2-9):

- die Rationalisierung der betrieblichen Abläufe im Produkterstellungsprozess,
- die Senkung der Herstellkosten durch die kostengünstige Konstruktion der Produkte.

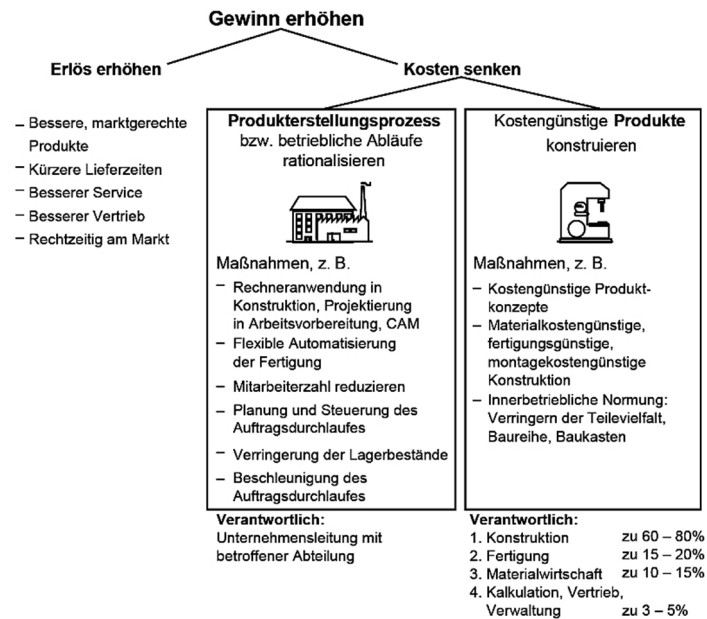


Abb. 2-9: Stoßrichtungen zum Kostensenken im Unternehmen [EhMe13]

Der Begriff der Rationalisierung fasst alle Maßnahmen zur effizienten Gestaltung der betrieblichen Abläufe zusammen, um dadurch die Herstellkosten eines Produkts zu reduzieren. Dazu zählen u. a. verstärkter Einsatz von Rechnern in der Prozesskette Konstruktion-Fertigung, Automatisierung in der Fertigungsplanung und Fertigung oder die Beschleunigung des Auftragsdurchlaufs durch weitere organisatorische Schritte. Parallel dazu soll die Strategie der Entwicklung kostengünstiger Produkte verfolgt werden. Dabei geht es um das Erarbeiten kostengünstiger Produktkonzepte und konstruktiver Problemlösungen, welche auf den Empfehlungen, Richtlinien, den norm-, fertigungs-, werkstoffgerechten Gestaltungsregeln und dem innerbetrieblichen Erfahrungswissen basieren.

Ein Überblick über die verschiedensten Einflussgrößen auf die Herstellkosten wird in [VDI2235] und [EhMe13] aufgestellt (vgl. Abb. 2-10).

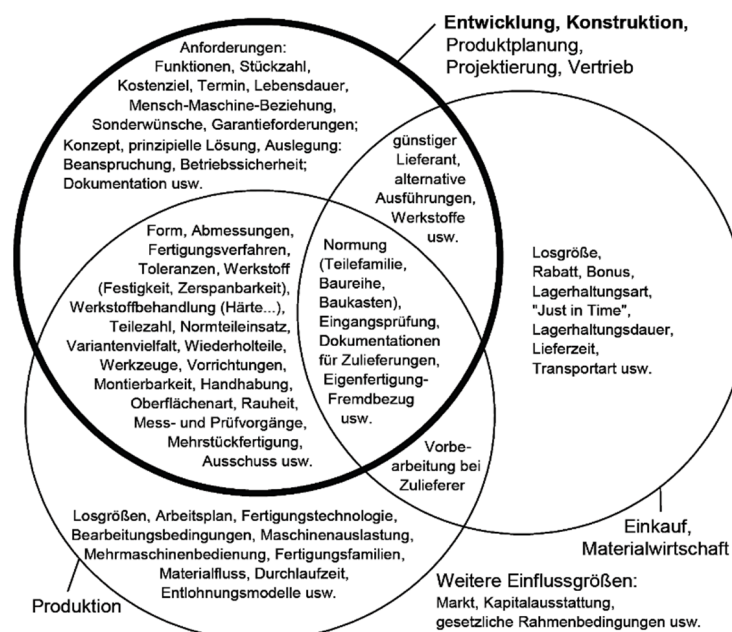


Abb. 2-10: Einflussgrößen auf die Herstellkosten [VDI2235] und [EhMe13]

Zu den Haupteinflussgrößen, welche u. a. in der Teilezahl, der Anzahl der Maße je Einzelteil, der Fertigungsoperationen und der Genauigkeit ausdrückt werden, gehören z. B. die prinzipielle Lösung, die Kompliziertheit, die Baugröße, der Werkstoff, die Stückzahl oder die Losgröße. Diese Einflussgrößen beeinflussen die zum Einsatz kommenden Fertigungsverfahren und damit auch die Herstellkosten signifikant. Werden die Haupteinflussgrößen z. B. im Anforderungskatalog bereits festgelegt, treten sekundäre Einflussgrößen wie die Oberflächenbeschaffenheit oder Gestaltdetails in den Vordergrund [Jü91].

Einen ebenfalls immer wichtiger werdenden Faktor stellt die Erstellung und Verwaltung der Produktdaten dar. Dabei können durch eine hohe Produktdatenqualität Kosten eingespart werden, indem ein einheitliches, durchgängiges und um die Fertigungsinformationen angereichertes 3D-CAD-Modell gewährleistet wird. Mit dessen Hilfe könnten beispielsweise einige Fertigungsprobleme bereits in der Konstruktionsphase identifiziert werden. Anhand der aus der Praxiserfahrung formulierten „Zehner-Regel“ wird deutlich, dass Produktänderungen um den Faktor zehn kostenintensiver sind, je später sie im Produktlebenszyklus erfolgen. Kostet eine Änderung in der Aufgabenklärung noch 1 €, steigern sich die Kosten bis auf 10.000 €, wenn diese in der Nutzungsphase des Produktes durchgeführt werden muss [EKL14]. Diese Überlegungen bestärken die Notwendigkeit der Kostenanalyse und Kostenkontrolle während des Konstruktionsprozesses (vgl. [EhMe13], [EKL14]).

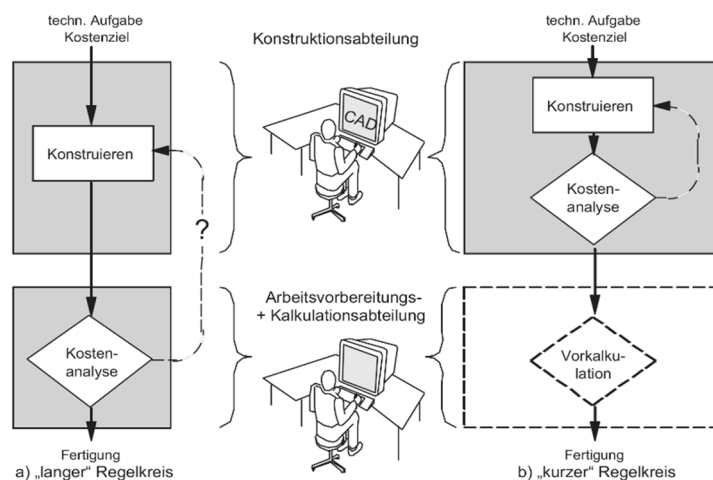


Abb. 2-11: Kostenanalyse während der Konstruktion [EhMe13]

Diese Idee ist nicht neu, denn bereits im Jahr 1987 wurde diese Notwendigkeit in der VDI-Richtlinie [VDI2235] formuliert. Jedoch stehen der hohen Kostenverantwortung in dem Entwicklungs- und Konstruktionsprozess das dürftige Kostenwissen und die mangelhafte Kostenberücksichtigung beim Konstruieren heutzutage immer noch entgegen [EhMe13]. Als grundlegende Ursache wird vor allem die immer noch bestehende Trennung von Technik und Betriebswirtschaft in den Unternehmen genannt, wodurch keine Kostentransparenz und Wissen über Kostenauswirkungen der technischen Lösungen in der Konstruktion bekannt sind. Eine betriebswirtschaftliche Kostenrechnung zielt auf die Lohnabrechnung und anderweitige Verrechnung der Kosten und ist daher für schnelle Übersichten und Auswertung unter Konstruktionsgesichtspunkten ungeeignet. Auf der anderen Seite sind diese Daten für die Kostenermittlung und -berücksichtigung während der Konstruktion auch nicht zu vernachlässigen, müssen aber entsprechend aufbereitet und zur Verfügung gestellt werden. Die traditionelle technische Kostenrechnung baut immer noch auf vollständigen 2D-Zeichnungen auf, woraus die Arbeitspläne erstellt und daraus wiederum die Herstellkosten berechnet werden. Auch wenn im Laufe des Konstruktionsprozesses die Produktdokumentation noch nicht vollständig ist,

und dadurch die Kostenbeurteilung schwierig und ungenau sein kann, ist es besser, eine ungefähre Kostenabschätzung in dieser Phase zu haben als keine. Entscheidend ist es jedoch, die Daten, Informationen und Wissen über die kostenbeeinflussende Maßnahmen in die Konstruktion einfließen zu lassen, denn sonst ist die Grundvoraussetzung zum kostengünstigen Konstruieren nicht gegeben. Das sei auch eine der schwierigsten Aufgaben:

„Das Wissen und die Erfahrung des ganzen Unternehmens für die Produktentwicklung nutzbar zu machen, ist die wichtigste und zugleich schwierigste Aufgabe für die Produktentwickler“ [EKL14].

Wird die Grundvoraussetzung erfüllt und ist die Daten-, Informations- und Wissensverfügbarkeit gegeben, sind weitere Maßnahmen zum Treffen von wirtschaftlichen Entscheidungen beim Konstruieren notwendig (vgl. auch [VDI2235]). Nach FISCHER [Fi08] sowie entsprechend der Zusammensetzung der Herstellkosten aus Material- und Fertigungskosten lassen sich beispielhafte Maßnahmen zur Kostenbeeinflussung ableiten.

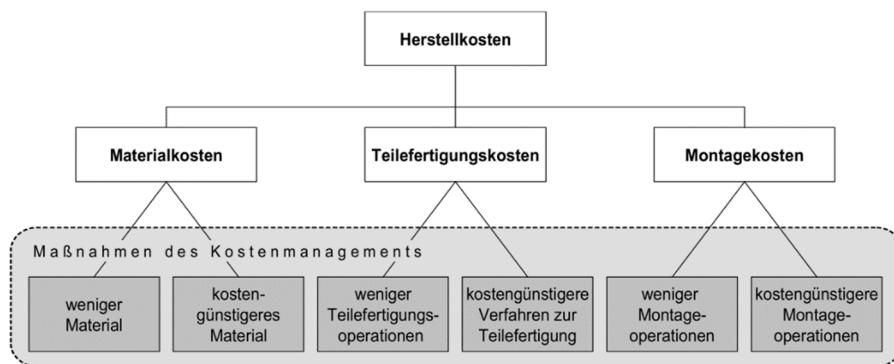


Abb. 2-12: Maßnahmen zur Reduzierung der Herstellkosten [Fi08]

Des Weiteren sollen nach EHRENSPIEL [EKL14] u. a. auch folgende Fragen berücksichtigt und betrachtet werden:

- Dienen alle bearbeiteten Flächen der Funktionserfüllung?
- Können unterschiedliche Abmessungen vereinheitlicht werden?
- Ist eine geringere Oberflächenqualität und sind größere Toleranzen möglich?
- Kann das Bauteil besser verschachtelt werden?
- Müssen alle Wirkflächen bearbeitet werden?
- Muss das Bauteil im Haus gefertigt werden?
- Wird die Fertigungstechnologie im Haus/bei Zulieferern beherrscht?
- Ist die Reihenfolge der Arbeitsgänge optimal?
- Ist die Fertigung auf anderen Maschinen kostengünstiger?
- Sind andere Bearbeitungsverfahren zur Werkstofftrennung, zur Oberflächenbehandlung, zum Fügen und Montieren möglich?
- Kann das Spanvolumen reduziert werden?

Im Hinblick auf die bereits erwähnte Problematik der direkten Bewertungsmöglichkeiten der fertigungstechnischen Kostenauswirkungen während des Konstruktionsprozesses sind vor allem neue strategische Vorgehensweisen und CAD-Methoden notwendig. Diese sollen den fertigungsoptimalen und somit auch den herstellkostengünstigen Entwicklungs- und Konstruktionsprozess z. B. durch die Nutzung der Methoden der konstruktionsbegleitenden Kalkulationen (KBK) unterstützen.

2.2.2 Konstruktionsbegleitende Kalkulation (KBK)

Eine mögliche Systematisierung der Methoden ist in der Abb. 2-13 dargestellt.

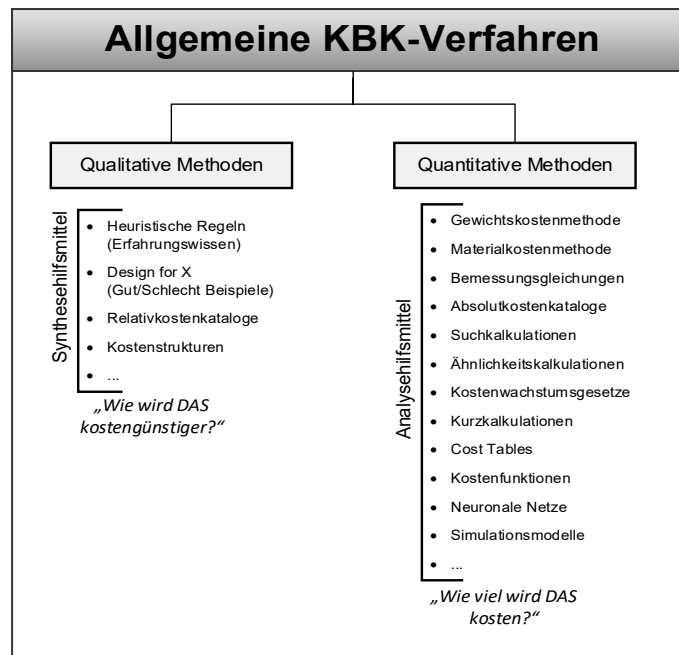


Abb. 2-13: Systematisierung der KBK-Methoden nach [Mö03], [Mö11] und [Hi11]

Dabei kann generell zwischen qualitativen und quantitativen KBK-Methoden differenziert werden. Qualitative Methoden werden zur Vorauswahl bei der Lösungssuche eingesetzt, mit denen in erster Linie keine konkreten Kostenaussagen getroffen werden können. Es lassen sich lediglich die Tendenzen der Kostenauswirkung konstruktiver Maßnahmen erkennen. Sie stellen somit ein Hilfsmittel zur Lieferung von Kosteninformationen bei der Lösungssynthese dar und sollen dem Konstrukteur helfen, einen voraussichtlich kostengünstigen Entwurf zu erstellen [Mö11]. Die Kernfrage, die sich der Konstrukteur bei der Nutzung der Methoden stellt, lautet: *Wie wird DAS kostengünstiger?*

Die quantitativen KBK-Methoden liefern ein konkretes, in Einheiten (Geld/Zeit) ausgedrücktes Resultat, welches aus dem konstruktiven Lösungsvorschlag hervorgeht, gleichzeitig aber die Bewertung der verbliebenen Lösungsvorschläge unterstützen und die Auswahl zwischen Lösungsalternativen erleichtern soll. Der Konstrukteur kann mit deren Hilfe die Einhaltung des Kostenziels überprüfen. Somit stellen sie ein Hilfsmittel zur Feststellung der Eigenschaft Kosten dar. Die Kernfrage, die sich der Konstrukteur bei der Nutzung der Methoden stellt, lautet: *Wie viel kostet DAS?*

Eine weitere Systematisierung der qualitativen und quantitativen KBK-Methoden wird durch MÖLLER [Mö11] vorgenommen, wo zusätzlich zwischen konstruktiv orientierten und kalkulations-/kostenorientierten Verfahren unterschieden wird.

2.2.2.1 Qualitative, konstruktiv orientierte KBK-Methoden

Die konstruktiv orientierten Verfahren unterstützen den Entwicklungskonstrukteur u. a. bei der kostengerechten Konstruktion und zeichnen sich durch ihre Technikzentriertheit und gegebenenfalls ihre Anbindung an die 3D-CAD-Systeme aus. Im Vordergrund steht hier vor allem der Aspekt der Konstruktion, welche mit betriebswirtschaftlichen Informationen unterstützt wird. Qualitative, konstruktiv orientierte KBK-Methoden basieren in der Regel auf dem Erfahrungswissen. Dabei lassen sich unterschiedliche Aggregationsstufen unterscheiden, wie dieses Wissen dem Nutzer zur Verfügung gestellt wird. Den einfachsten Fall stellen die heuristischen Regeln für eine kostengünstige und fertigungsoptimale Konstruktion dar, wie z. B. „Nutzung möglichst vieler Normteile“, „Verwendung großer Toleranzen“ oder „viele Gleichteile“. Die nächste Stufe sind Gut-Schlecht-Beispiele (z. B. [Pa07], [FeGr13], [EKL14], [KPP12], [KrSt14]). Dabei handelt es sich um gut vermittelbare und einprägsam dargestellte Gegenüberstellungen von gut und schlecht konstruierten Lösungen hinsichtlich einer zu erfüllenden Gerechtigkeit. Sie können in der Form von Richtlinien und Konstruktionsempfehlungen dem Entwickler zur Unterstützung konstruktiver Tätigkeit zur Verfügung gestellt werden. Eine stärkere Formalisierung von Erfahrungswissen stellt die Verwendung von Relativkostenkatalogen und Kostenstrukturen dar. Dabei handelt es sich um Bewertungszahlen, die das Kostenverhältnis alternativer möglicher Lösungen untereinander oder in Bezug zu einer Basiszahl angeben. Sie dienen dem Konstrukteur bereits bei der Produktentwicklung zur Kosteninformation. Wenn sich Produktionsmittel, Fertigungsverfahren oder Werkstoffpreise ändern, so müssen die Relativkosten neu berechnet und aktualisiert werden. Auch Relativkosten sind für Kalkulationen nur bedingt geeignet, da Voraussetzung für ihre Verwendung das Vorliegen eines Initialwertes ist [Mö11].

2.2.2.2 Quantitative, kalkulations-/kostenorientierte KBK-Methoden

Quantitative Methoden stammen überwiegend aus einem betriebswirtschaftlichen Umfeld und sind durch die ökonomische Sichtweise geprägt. Aufgrund ihrer primären Aufgabe, die Kostenziele und Kosteninformationen für die Entwicklung zu liefern, werden sie auch häufig als Kosteninformationssysteme bezeichnet. Zu den quantitativen Methoden zählen Berechnungsverfahren und Kalkulationen wie z. B. Materialkostenmethode, Gewichtskostenkalkulationen oder Kostenwachstumsgesetze, aber auch komplexe EDV-Lösungen in Form von Programmen, Tools und Applikationen. Ein Überblick über die quantitativen Verfahren und Methoden wird in [Re01] und [EKL14] gegeben. Die wesentlichen Unterschiede zwischen den dort zusammengefassten Ansätzen und Systemen sind die zugrunde liegenden Kalkulationsverfahren und der Umfang der betrachteten Kostenanteile. Um jedoch die quantitativen KBK-Methoden zum zentralen Lösungselement der Kostenfrüherkennung in dem heutigen Entwicklungs- und Konstruktionsprozess zu etablieren, ist eine Rechnerunterstützung und somit die Anbindung an die 3D-CAD-Systeme bzw. eine Kopplung mit dem virtuellen Produktmodell (VPM) unabdingbar. In dieser Hinsicht ist der Ansatz von REISCHL [Re01], welcher in dem Prototyp „extendiertes Kosteninformationssystem“ (XKIS) zur Kostenzielverfolgung abgebildet wird, hervorzuheben. Dadurch wird dem Konstrukteur ein kalkulatorischer Vergleich unterschiedlicher konstruktiver Lösungen ermöglicht und dadurch auch eine Entscheidungshilfe bei konstruktiven Problemen gegeben. Die Grundlage dafür bilden die Methoden und Strategien zur Featurestrukturanalyse von 3D-Geometriemodellen und eine detaillierte Gliederung der von XKIS ermittelten Herstellkosten.

2.2.3 Bedeutung der norm- und fertigungsgerechten Konstruktion

Zwischen funktions-, norm- und fertigungsgerechter Produktgestaltung bestehen sehr enge Wechselwirkungen, deren Beachtung gerade bei komplexen Geometrien eine besondere Herausforderung darstellt. Nach FISCHER [Fi08] und EHRENSPIEL [EhMe13] beeinflusst der Konstrukteur die Kosten mit verschiedenen konstruktiven Entscheidungen. Wie in Abb. 2-14 gezeigt, können dabei die von ihm zu gestaltenden Einflussgrößen den unterschiedlichen Konstruktionsphasen zugeordnet werden.

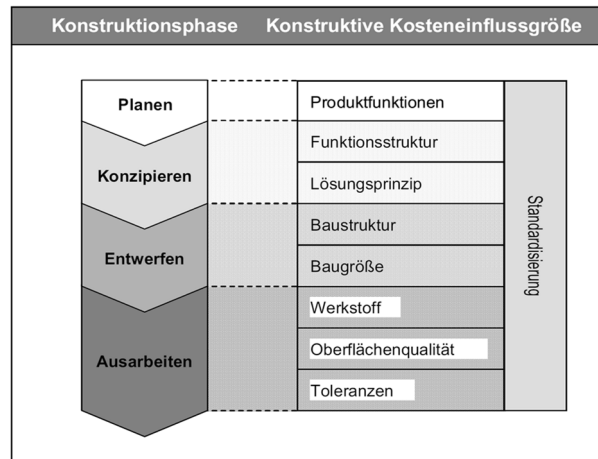


Abb. 2-14: Konstruktionsphasen und konstruktive Kosteneinflussgrößen[EhMe13] und [Fi08]

Dabei wird deutlich, dass die Standardisierung in allen Phasen des Konstruktionsprozesses die Herstellkostenbeeinflussung ermöglicht. Mit der Standardisierung ist grundsätzlich eine Vereinheitlichung von Größen, Maßen, Typen oder Vorgehensweisen gemeint. Mit den Maßnahmen der Standardisierung sollen vor allem die Variantenvielfalt und die Komplexität der Erzeugnisse und Prozesse gesenkt werden. Dabei kennzeichnet die Komplexität die Eigenschaft, deren Grad nicht nur von der Anzahl der Elemente abhängt, sondern auch von der Vielzahl der Beziehungen und Verflechtungen zwischen diesen Elementen und auch die Anzahl möglicher Zustände umfasst. Die Reduktion der Variantenvielfalt ist somit auch ein wirksames Mittel zur Senkung der Herstellkosten.

Eine besondere Art der Standardisierung stellt die Normung dar. Der Mitbegründer des Deutschen Instituts für Normung (DIN), Otto Kienzle definiert Normung als:

„das einmalige Lösen eines sich wiederholenden technischen oder organisatorischen Vorgangs mit den zum Zeitpunkt der Erstellung der Norm bekannten optimalen Mitteln des Standes der Technik durch alle daran Interessierten. Sie ist damit eine stets zeitlich begrenzte technische und wirtschaftliche Optimierung.“

In der DIN-Norm [DIN45020] wird der Begriff einer Norm als:

„Dokument, das mit Konsens erstellt und von einer anerkannten Institution angenommen wurde und das für die allgemeine und wiederkehrende Anwendung Regeln, Leitlinien oder Merkmale für Tätigkeiten oder deren Ergebnisse festlegt (...)“

definiert. Eine Norm wird in einem festgelegten Prozess innerhalb einer Normungsorganisation entwickelt und kann sowohl auf Gegenstände als auch auf Verfahren angewandt werden.

In [HKM09] und [HMS13] werden umfangreiche Grundlagen der Standardisierung und Normung vermittelt sowie verschiedene Gründe und Motivationen zur Nutzung der Normen und Standards dargelegt (siehe Abb. 2-15).

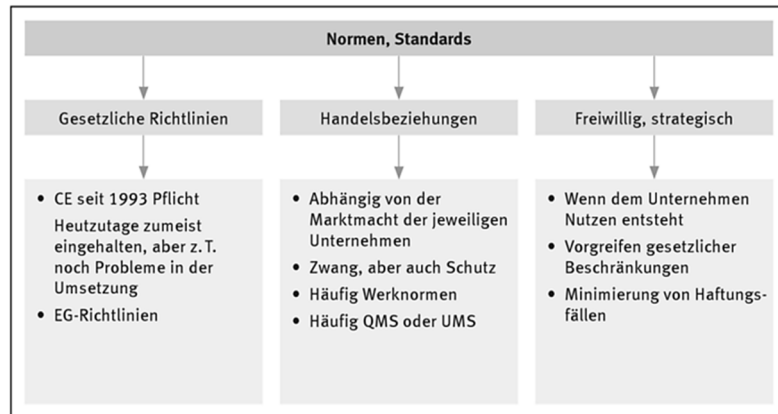


Abb. 2-15: Motivation und Nutzung von Normen und Standards [HKM09]

Dort wird u. a. auch festgestellt, dass die Beachtung und Einhaltung der gesetzlichen oder sicherheitsrelevanten Festlegungen, welche auf den Beziehungen zwischen dem Gesetzgeber, Sicherheits- und Liefervorschriften basieren und in den Richtlinien und Normen angegeben werden, die Produktentwicklung mit den entsprechenden Systemen wie z. B. PDM, CAD und PPS direkt beeinflussen.

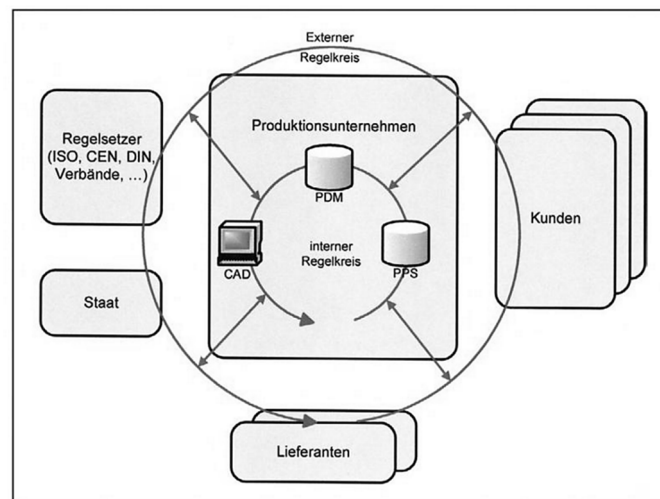


Abb. 2-16: Regelkreise in Verbindung von Normen und Standards [HKM09]

Demnach gehört die Normung und Standardisierung nach HARTLIEB et al. [HKM09] zu den strategischen und operativen Instrumenten, welche die Kosten und damit auch den wirtschaftlichen Erfolg eines Produktes beeinflussen, denn „je später die Berücksichtigung der Normung und Standardisierung erfolgt, desto höher sind die Änderungskosten des Produktes“.

In [EKL14] betrachtet EHRENSPIEL die Kosteneinsparung, die durch die Verwendung von Norm- und Kaufteilen und durch die Standardisierung der Produkte erzielt wird. Diesbezüglich werden dort folgende Maßnahmen und Aspekte betrachtet und diskutiert:

- Verwendung von Norm- und Kaufteilen,
- Erhöhung des Teilenormungsgrades,
- Vorgabe eines Malus/Korrekturfaktors für die Teilekalkulation,
- Suchsysteme für Wiederhol- und Ähnlichteile.

Der Begriff der fertigungsgerechten Konstruktion steht für eine gezielte Berücksichtigung der Möglichkeiten der Fertigungstechnik in allen Phasen des Konstruktionsprozesses. Vorrangig gelten die Grundsätze der Produktgestaltung: „Sicherheit“, „Einfachheit“ und „Eindeutigkeit“, da diese die Basis für das Erreichen der Ziele von fertigungsgerechter Konstruktion darstellen, welche sich in die Einhaltung von Vorgaben zur:

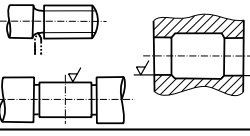
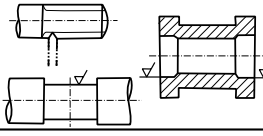
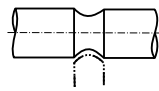
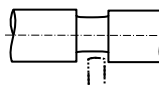
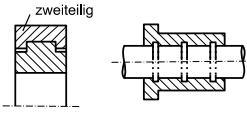
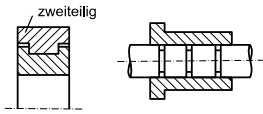
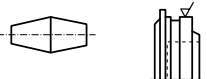
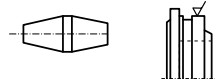
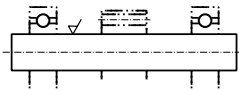
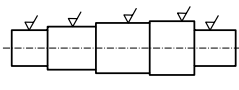
- fertigungsgerechten Baustruktur,
- fertigungsgerechten Werkstückgestaltung,
- fertigungsgerechten Werkstoffauswahl,
- Einsatz von Standard- und Fremdteilen und
- das Bereitstellen von fertigungsgerechten Fertigungsunterlagen

unterteilen lassen [KrSt14]. Im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen die Wechselwirkungen zwischen der Konstruktion und Fertigung, welche in der Literatur oft mit dem Begriff „Design for Manufacturing/Manufacturability“ in Verbindung gesetzt werden.

Im Rahmen der Baustrukturdefinition wird die Produktgliederung in Fertigungsbaugruppen und Werkstücke durch den Konstrukteur angegeben. Hierbei wird zwischen Differential-, Integral-, Verbund- und Bausteinbauweise unterschieden (vgl. [FeGr13], [Pa07]). Durch die Festlegung der Baustruktur wird die Auswahl geeigneter Passungen, Dimensionen der Werkstücke und die Art der Füge-, Montage- und Kontrollstellen und somit auch die Entscheidungen über die Fertigungs- und Beschaffungsart sowie den Fertigungsablauf durch den Konstrukteur implizit oder explizit festgelegt.

Der Schwerpunkt einer fertigungsgerechten Werkstückgestaltung liegt in der möglichst optimalen Erfüllung der Forderungen und Eigenheiten der jeweiligen Fertigungsverfahren [Pa07], [FeGr13]. Diese nimmt eine gesonderte Stellung unter den Gestaltungsrestriktionen ein, da die in der Entwicklungsphase getroffenen Entscheidungen einen sehr großen Einfluss auf Zeit und Kosten der Fertigung haben. Nach HOENOW und MEISSNER [HoMe10], [HoMe12] sind fertigungs- und kostengerechtes Gestalten sogar untrennbar miteinander verbunden. Außerdem werden alle Bauteile mit dem Ziel der Fertigbarkeit entwickelt, weswegen die fertigungsgerechte Gestaltung bei jeder Produktentstehung die Beachtung finden muss [FeGr13], [Pa07]. Maßnahmen für eine fertigungsgerechte Konstruktion dienen nach [Kö14] dem Gestalten eines, mit den gegebenen Fertigungsverfahren und Fertigungsmitteln herstellbaren Werkstücks, wobei eine hohe Qualität bei geringem Aufwand erreicht werden soll. In der Literatur gibt es Richtlinien für eine fertigungsgerechte Werkstückgestaltung, welche nach den Hauptgruppen der Fertigungsverfahren nach DIN-Norm [DIN8589] unterteilt sind (vgl. [FeGr13] oder [RiSt12]). Innerhalb jeder Hauptgruppe werden verschiedene fertigungsverfahrensspezifische Gestaltungsrestriktionen herangezogen und entsprechende Empfehlungen angegeben, um typische Gestaltungsfehler zu vermeiden. Zu den zu beachtenden Aspekten gehören u. a. die Eigenheiten der Werkzeuge, der Einspannung des Werkstückes sowie des eigentlichen Spanvorganges. Für die jeweiligen Fertigungsverfahren ergeben sich aus den spezifischen Eigenschaften der Fertigung verschiedene Anforderungen, die ein Modell erfüllen muss, mit dem Ziel die Qualität (Q) zu steigern oder den Aufwand (A) zu verringern. Hierzu werden die Gestaltungsrichtlinien für die spanenden Fertigungsverfahren (FV) in werkzeuggerechte (WG) und spangerechte (SG) Richtlinien eingeteilt. In der Tabelle 2-3 sind Gestaltungsrichtlinien für die Drehbearbeitung aufgeführt, unter deren Berücksichtigung die Güte der Konstruktion zunehmen soll [FeGr13].

Tabelle 2-3: Gestaltungsrichtlinien mit Beispielen für Teile mit Drehbearbeitung nach [FeGr13]

FV	Gestaltungsrichtlinien	Ziel	nicht fertigungsgerecht	fertigungsgerecht
WG	Beachten des erforderlichen Werkzeugauslaufs.	Q		
WG	Anstreben einfacher Formmeißel.	A		
WG	Vermeiden von Nuten und engen Toleranzen bei Innenbearbeitung.	A Q		
WG	Vorsehen ausreichender Spannmöglichkeiten.	Q		
SG	Anpassen der Bearbeitungslängen und -güten an Funktion.	A		

Zu den typischen Grundsätzen der spangerechten Gestaltung gehört z. B. das Vermeiden unnötiger Zerspanarbeit. Hinsichtlich der werkzeuggerechten Gestaltung werden vor allem die Spannmöglichkeiten, die Reduzierung von Umspannvorgängen sowie die Beachtung des Werkzeugauslaufs genannt. Daraus geht jedoch nicht hervor, dass für bestimmte Werkstücke die Werkzeugabmessungen und die Eingriffssituation des Werkzeugs in Abhängigkeit vom Werkzeugverfahrweg von besonderer Bedeutung sein können.

Im Zuge der fertigungsgerechten Werkstoffauswahl erfolgt eine Beeinflussung der Fertigungsverfahren, der Werkzeugmaschinen, der Materialwirtschaft sowie der Qualitätskontrolle. Gerade bei materialintensiven Produkten ist eine geeignete Werkstoffauswahl produktkostenbestimmend. Die Entscheidungsgrundlage hierbei dürfen nicht ausschließlich die Gewichtskosten sein. Wichtig ist, fertigungstechnische Aspekte mit in die Kalkulation einzubeziehen und so die ganzheitlich günstigste Werkstoffauswahl zu treffen. Der Einsatz von Standard- und Fremdteilen ist nach [FeGr13] und [Pa07] eine Zielsetzung der fertigungsgerechten Konstruktion, weil die Verwendung von Normteilen und handelsüblichen Zukaufteilen häufig günstiger als eine Eigenfertigung ist. Die Entscheidung für Eigen- oder Fremdfertigung hängt hierbei nicht nur von den Kapazitäts-, Lagerhaltungs- und Wirtschaftlichkeitsgesichtspunkten ab, aber auch vom Bestreben, die wirtschaftliche Wertigkeit der Lösung zu optimieren. Die Erstellung von fertigungsverfahrens-, arbeitsablauf- und qualitätskontrollabhängigen Fertigungsunterlagen in Form von CAD-Modellen, Stücklisten, Zeichnungen, und Montageanweisungen haben einen häufig unterschätzten Einfluss auf Kosten und Qualität des Produktes [FeGr13] und [Pa07]. Eine sinnvolle Erzeugnisgliederung ist elementar für optimale Kapazitätsauslastung und termingerechte Produktion. Weiterführende Informationen zum Thema Erzeugnisgliederung sind in [Co13] nachzulesen.

2.3 Strategische Möglichkeiten zur Beeinflussung der Produktivität

2.3.1 Betrachtung der Produktivität

Für eine zielorientierte Betrachtung und Berücksichtigung möglichst aller Einflussfaktoren auf die Prozesskette Konstruktion-Fertigung kann grundsätzlich der Begriff der Produktivität herangezogen werden. Die Produktivität ist zwar aufgrund des spezifischen Interesses des Betrachters und hinsichtlich verschiedener Tätigkeitsbereiche unterschiedlich definiert [Ho14], jedoch ist festzustellen, dass der Begriff der Produktivität grundsätzlich eine technische Mengenbeziehung darstellt und als ein Sammelbegriff für die technische Leistungsfähigkeit eines Prozesses, Betriebes, Produktionsbereiches oder Arbeitsschrittes verwendet werden kann [De94], [Pa05]. Letztlich zielt das Vorhaben der Produktivitätssteigerung darauf, die Ressourcen in Form von Geld, Arbeit, Zeit, aber auch Wissen produktiv (schöpferisch) zu machen.

Im Rahmen dieser Arbeit bezieht sich der Begriff Produktivität auf die technische Produktivität, welche durch die Begriffe Effektivität und Effizienz ausgedrückt werden kann. Effektivität zielt auf die Leistungsseite mit der Frage, ob und wie weit die „richtigen Dinge zum richtigen Zeitpunkt“ getan werden können. Die Effizienz bezieht sich auf die Inputseite, wo es um die Frage der bestmöglichen Ausführung vorgegebener Aufgaben geht, was mit dem Motto „die Dinge richtig tun“ treffend bezeichnet wird. Die Steuerung der Produktivität ist im Rahmen dieser Arbeit nicht als eine operative Aufgabe anzusehen, sondern vielmehr als eine strategische. Durch die strategische Betrachtungsweise wird der Blick von kurzfristig operationalen Ergebnisgrößen auf langfristige und oftmals qualitativ geprägte Erfolgspotenziale gerichtet.



Abb. 2-17: Produktivität, Effizienz und Effektivität nach [De94]

Eine wirksame Verbesserung der Produktivität ist nur mit einer gleichzeitigen Berücksichtigung der Außensicht (Markt) und der Innensicht (Organisation, Prozesse, Mitarbeiter) zu erreichen. Somit ist das Ziel nicht, die eine perfekte Messgröße für die Produktivität zu finden und diese zu optimieren [HeSt10]. Es geht eher darum eine Kombination von Messgrößen im Blick zu behalten und diese durch strategisches Vorgehen in der Prozesskette Konstruktion-Fertigung positiv zu beeinflussen.

„Strategisches Denken und Handeln zielt auf Analyse, Erhalt und Beeinflussung sowie Schaffung von Potentialen, die unternehmerische Optionen in der Zukunft erfolgsorientiert eröffnen sollen“ [Ki90].

Bezogen auf die Prozesskette Konstruktion-Fertigung kann die Produktivitätssteigerung erreicht werden, in dem u. a.:

- organisatorische Maßnahmen zur Unterstützung der firmeninternen und firmenübergreifenden Kommunikation von Ingenieuren in global verteilten Produktentstehungsprozessen verschiedener Disziplinen und damit zur Verbesserung der Gruppen- und Teamarbeit vorgenommen werden,
- eine ganzheitliche Analyse und Synthese der Prozessabläufe durchgeführt wird, um Schwachstellen zu identifizieren und Verbesserungspotenziale aufzudecken,
- eine optimale Ausnutzung der in den Prozessen und prozessübergreifend eingesetzten IT-Systeme und Werkzeuge zur Gestaltung und Produktion der Produkte angestrebt wird,
- den in den Prozessen beteiligten Personen verbesserte Methoden, Werkzeuge und Vorgehensweisen zu Verfügung gestellt werden, um eine frühzeitigere Erhöhung des Produktwissens und der Absicherung von Entscheidungen zu ermöglichen und damit Fehlerquoten zu minimieren,
- eine durchgängige Kopplung der Prozessschritte zur Beschleunigung der Prozessabläufe und Sicherung der Datenqualität ohne Brüche erreicht wird,
- neue IT-Technologien und Verfahren zu Vernetzung und Wissensaustausch zwischen den in der Prozesskette beteiligten Systemen und Personen genutzt werden, um einen gemeinsamen Zugriff auf alle für das Produkt während aller Phasen des Produktlebenszyklus relevanten Informationen zu gewährleisten und damit eine hohe Qualität des 3D-Produktdatenmodells abzusichern.

2.3.2 Organisatorische und methodische Aspekte

Die Beschleunigung des Produktentstehungsprozesses sowie die Verbesserung der Qualität des Produktes und niedrige Entwicklungskosten sind heutzutage weit verbreitete Optimierungskriterien, nach denen sich ein Unternehmen richtet. Mit dem Fortschritt der Informations- und Kommunikationstechnik zusammen mit dem Einsatz rechnerunterstützter Werkzeuge sind unterschiedliche organisatorische Konzepte entwickelt worden, die durch einen intensiven Informationsaustausch gekennzeichnet sind [VDI2209]. Dazu gehören u. a. Simultaneous Engineering, Concurrent Engineering, Collaborative Engineering, Cross Enterprise Engineering oder Frontloading, welche auf eine verbesserte Informationsstellung und Abstimmung sowie schnellere Entscheidungsfindung zielen und somit höhere Produktivität und Verbesserung konventioneller Arbeitsprozesse unterstützen sollen.

Ein Vergleich der Adjektive simultaneous und concurrent ergibt, dass beide Begriffe zur Kennzeichnung zeitparalleler Ereignisse und Vorgänge eingesetzt werden [SpKr97]. In der Verbindung mit den Entwicklungs- und Konstruktionsphasen der Produktentwicklung sollen Simultaneous und Concurrent Engineering als organisatorische Maßnahmen verstanden werden, bei denen eine Folge von sequenziell angeordneten Schritten mehr und mehr einer zeitlichen Parallelisierung unterworfen wird. Dadurch soll aus der Sicht des Informationsflussprozesses ein höherer Grad an Informationsaustausch und Tätigkeitsbestimmung zwischen den einzelnen Funktionsbereichen gewährleistet sein. In der VDI-Richtlinie [VDI2209] wird mit Simultaneous Engineering auf unterschiedliche Aktivitäten, die parallel oder überlappt ablaufen, verwiesen (z. B. Konstruktion und Arbeitsplanung). „Concurrent“ bedeutet, dass eine einzelne Aktivität aufgeteilt wird, die dann einen parallelen Ablauf als Teilaktivitäten annimmt (z. B. mehrere Teams entwickeln gemeinsam und gleichzeitig eine Automobilkarosserie). Aus dem Vergleich der sequenziellen und simultanen Vorgehensweisen lässt sich feststellen, dass eine zeitparallele Ausführung von Arbeitsschritten einen hohen Synchronisationsbedarf verlangt, der durch einen ständigen und frühzeitigen Informationsaustausch zwischen den

zusammen kooperierenden Abteilungen geprägt ist. Im Zuge der Globalisierung von Projekten gewinnt der effiziente Informationsaustausch zwischen den Projektteams an unterschiedlichen Standorten und mit verschiedenen technischen Voraussetzungen zunehmend an Bedeutung. In diesem Zusammenhang hat sich der Begriff Collaborative Engineering etabliert, der nicht als eine neue Methode anzusehen ist, sondern als eine Erweiterung und Anpassung der Simultaneous oder Concurrent Engineering für die weltweit agierenden Unternehmen [Le14b]. Mit dem Collaboration Engineering soll durch die konsequente und frühzeitige Integration und Nutzung der IT-Technologien während des gesamten Produktentstehungsprozesses eine effiziente Zusammenarbeit zwischen unterschiedlichen Unternehmen, Kunden, Lieferanten und Dienstleistern geschaffen und gewährleistet werden. Durch den Begriff Cross Enterprise Engineering wird zusätzlich die Bedeutung der mehrdimensionalen Zusammenarbeit und Kooperation innerhalb eines Unternehmens und im Rahmen der Zuliefer- und Kundenbeziehung über die Unternehmensgrenzen hinweg über alle Disziplinen und alle Phasen des Produktentstehungsprozesses betont [EiSt09].

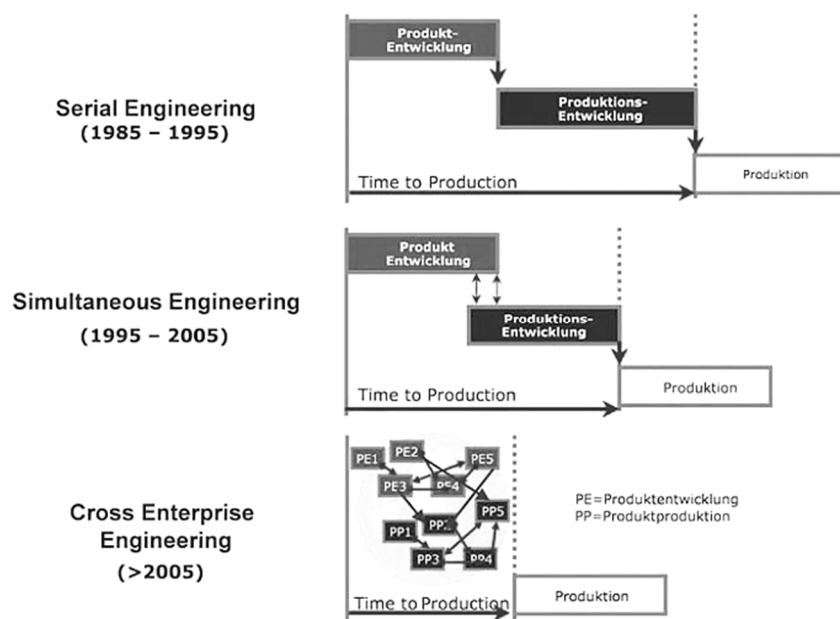


Abb. 2-18: Veränderungen der methodischen Produktentstehungsmethoden [EiSt09]

Die Einführung der erwähnten Ansätze und Methoden in der Praxis stellt gleichzeitig hohe Anforderungen an technische IT- und PLM-Lösungen und fordert eine durchgängige Prozessintegration, um allen Prozessbeteiligten den problemlosen Zugriff auf alle Informationen zu ermöglichen. Wird der Zugriff schon in den frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses gewährleistet, lässt sich auch der Frontloading-Ansatz realisieren, welcher die Anstrengungen verfolgt, die Funktionsweisen, Betriebsverhalten, technologische und sonstige Eigenschaften eines Produktes o. ä. so früh wie möglich in der Entwicklung mithilfe von digitalen Modellen zu prüfen [Ke14]. Die Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz der Methoden ist die teamorientierte und bereichsübergreifende Arbeitsweise, die durch gegenseitige Anregungen, konstruktive Anmerkungen und direkte Teilnahme am Informationsaustausch einen Wissenszuwachs in dem Unternehmen begünstigt.

Ein weiterer Aspekt, welcher die Qualität und die Produktivität der Prozesskette Konstruktion-Fertigung beeinflusst, sind die Konstruktions- und Modellierungsabläufe. Die Konsequenzen der nicht einheitlichen und standardisierten Vorgehensweisen sind spätestens bei einer Modellanpassung bzw. Auftragsänderung an neue Randbedingungen sichtbar. Somit fordert der Umgang mit heutigen

3D-CAD-Systemen eine vorab überlegte und analysierte, sowie äußerst exakt durchgeführte Modellierung der Produkte, welche als problemabhängige Modellierungsmethoden benannt werden. Dabei haben neben der Sachkompetenz und Kreativität des Konstrukteurs auch die Leistungsmerkmale der angewandten 3D-CAD-Systeme eine der entscheidenden Rollen in dem Entwicklungsprozess der CAD-Methoden. Dass der Handlungsbedarf in diesem Umfeld vonnöten ist, bestätigt die im Jahr 2012 veröffentlichte Studie „Konstrukteur 2020“ [ADM12], in der die Tätigkeitsfelder und die zukünftigen Perspektiven des Konstrukteurs dargestellt werden. Dort wird festgestellt, dass sich der Begriff der Konstruktion im Laufe der Zeit tiefgreifend gewandelt hat. Als die treibende Kraft des Wandels wird u. a. die Computertechnik, insbesondere das CAD genannt. Jedoch kommt nach der Meinung der Befragten die Konstruktionsmethodik im Zusammenhang mit CAD in der Ausbildung eines Konstrukteurs oft zu kurz. Als Beispiel wird dort die Vorgehensweise beim Konstruieren und einem sinnvollen Aufbau von CAD-Modellen genannt. Daraus ergibt sich ein Handlungsbedarf, um die Produktentwickler und Konstrukteure in dieser Hinsicht bei fertigungstechnischen Belangen während der 3D-Produktmodellierung konkret zu unterstützen. Das kann und soll in der Form einer CAD-Methodik, also einer planmäßigen Vorgehensweise zur Erreichung eines bestimmten Ziels nach einem Vorgehensplan und unter Einschluss von Strategien, Methoden, Werkzeugen und Hilfsmitteln [EhMe13] erfolgen.

2.3.3 Informations- und Wissensmanagement

Informationen und Wissen sind der Schlüssel zur Steigerung der Produktivität und dadurch der Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens. Daher wird immer intensiver geforscht und versucht, anwendungs- und branchenspezifische Daten, Informationen und daraus entstehendes Wissen als Rohstoff für die Optimierung der Prozessabläufe bereitzustellen.

Als Daten werden nach [Va09] elektronisch gespeicherte Einheiten genannt, die nach bestimmten Gesichtspunkten zusammengestellt sind. Im Zusammenhang mit Daten handelt es sich um Informationen, die in Anlagen zur automatischen Verarbeitung gesendet oder empfangen werden können [Sp02]. Nach der DIN-Norm [DIN44300] sind Daten Zeichen oder kontinuierliche Funktionen, die von bekannten oder einvernehmlichen Abmachungen zum Zwecke der Verarbeitung dienen. Durch Verknüpfung der Daten mit Wissensbausteinen entstehen für Anwendersysteme gebrauchsfähige Informationen [Ju02].

Die Entstehung, Ausbreitung und Anwendung der Ressource Wissen gehören zu den wichtigsten Wachstumsdeterminanten in den heutigen Unternehmen. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Mechanismen, wie neues Wissen entsteht und wie der Erfolg von Unternehmen beeinflusst werden kann, zu beschreiben. NORTH [No11] stellt dafür einen Ansatz der Wissenstreppe dar, in dem in aufsteigender Reihenfolge folgende Stufen Zeichen, Daten, Informationen, Wissen, Können, Handeln, Kompetenz und Wettbewerbsfähigkeit angeordnet werden.



Abb. 2-19: Wissenstreppe nach North [No11]

Den Ausgangspunkt stellen Zeichen dar, die zusammengesetzt und nach vorgegebenen Regeln (einem Code oder einer Syntax) einen sinnvollen Zusammenhang ergeben und damit Daten repräsentieren. Wird diesen Daten eine konkrete oder abstrakte Bedeutung zugeordnet, ergeben sich Informationen. Diese Informationen sind jedoch für den Betrachter wertlos, wenn sie nicht mit anderen aktuellen oder in der Vergangenheit gespeicherten Informationen vernetzt werden. Somit stellt die Wissensgewinnung einen Prozess der zweckdienlichen Vernetzung von Informationen mit anderen Informationen oder Erfahrungen dar. Die Summe aus mehreren Informationen kann als Wissen angesehen werden, das durch seinen zweckorientierten Einsatz Erkenntnisse liefert.

Die Rollen und vielfältigen Interpretationsmöglichkeiten des Begriffs Wissen werden durch MILTON [Mi07] in inhaltlich und grafisch ansprechender Form beschrieben (siehe Abb. 2-20).

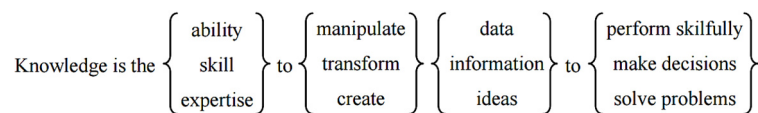


Abb. 2-20: Definition des Begriffes Wissen nach [Mi07]

Hinsichtlich der Prozessabläufe spielen Daten, Informationen und Wissen nach AAMODT & NYGÅRD [AaNy95] eine besondere zweifache Rolle, und zwar als Umsatzprodukt und als Katalysator eines Prozesses. Im ersten Fall unterliegen sie im Ausgangszustand (Zustand 1) einer Transformation und einem Transfer, infolgedessen am Ende des Prozesses ein neuer Zustand (Zustand 2) entsteht. Die Rolle der Daten, Informationen und des Wissens als Katalysator begünstigt eine optimierte Prozessdurchführung, indem beispielsweise die Schrittreihenfolge, Bewertung oder Entscheidung über die Wissenskatalysatoren festgelegt werden und somit zielorientierte Transformations- und Transfer-schritte vorgenommen werden können.

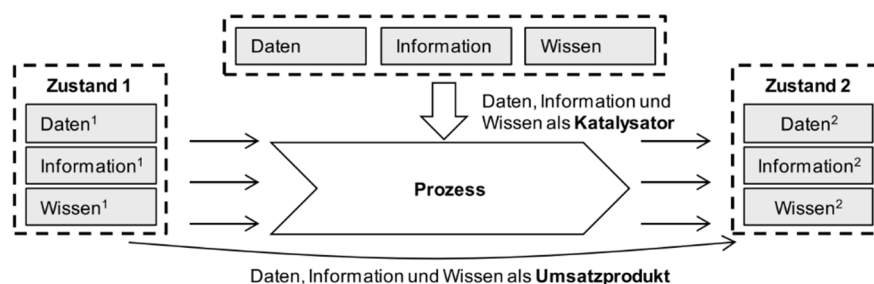


Abb. 2-21: Prozessbezogene Betrachtung der Daten, Informationen und des Wissens [Ko14]

Die technischen Entwicklungs- und Konstruktionsprozesse beruhen auf Daten, Informationen, Wissen und Können der einzelnen Mitarbeiter, Teams oder Experten, die durch systematische Beobachtungen, Erfahrungen, aber auch zufallsbedingte Empfindung oder Intuition geprägt sind. Diese werden meistens in Dateien, Akten, Produktdaten, 3D-Modellen und Datenbanken gesammelt, die das Unternehmenswissen darstellen.

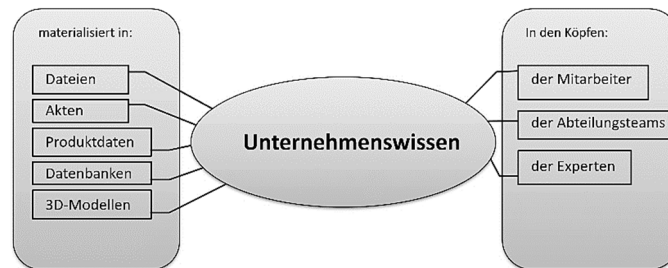


Abb. 2-22: Unternehmenswissen

Dabei zielt das Informationsmanagement auf den bestmöglichen Einsatz der Ressource Information im Hinblick auf die gestellte Unternehmensziele [Kr15]. Es sollen die richtigen Informationen am richtigen Ort und zum richtigen Zeitpunkt verfügbar gemacht werden [Ga06]. Das Management der Informationen beinhaltet das Sammeln, Transformieren, Sichern, Aufrufen und Verteilen der Informationen und wird durch den Einsatz der Technologien des Produktdatenmanagements, Produktlebenszyklusmanagements und der Produktinformationssysteme unterstützt [Ko14]. Durch den Wissensmanagementprozess werden Informationen im Zusammengang mit Expertisen zum Unternehmenswissen. Das wesentliche Ziel des Wissensmanagements ist nach NORTH [No11] vor allem, das Wissen nutzbar zu machen. In dieser Sichtweise umfasst Wissensmanagement u. a. folgende Aufgaben und Ziele:

- Wissensbeschaffung: Maßnahmen zur Sicherstellung, dass für alle Prozesse benötigtes Wissen zur Verfügung gestellt wird;
- Wissensentwicklung: Maßnahmen zur Sicherstellung, dass Wissen an der bestgeeigneten Stelle in oder außerhalb des Unternehmens entwickelt wird;
- Wissenstransformation: Maßnahmen zur Übertragung des Wissens vom einen Prozessbereich in den anderen;
- Wissenstransfer: Maßnahmen zur Sicherstellung, dass Wissen optimal nutzbar gemacht wird;
- Wissensweiterentwicklung: Maßnahmen zur Sicherstellung, dass Wissen anwendungsbezogen aktualisiert, weiterentwickelt wird und das alte Wissen abgeschafft und verlernt wird.

In diesem Kontext wird auch über die Entwicklung sog. Wissensbasis [Ko14] oder Wissensmodule [St06] gesprochen. Die Grundlagen, Konzepte und Vorgehensweisen für Wissensmanagement im Ingenieurwesen sind in der VDI-Richtlinie 5610-1 [VDI5610-1] zusammengefasst. Weitere Informationen zum Thema Wissensmanagement sind der Literatur zu entnehmen z. B. [Am04], [Le14a], [Fr12], [Sa14b].

2.3.4 PLM, SysLM und die 3D-Produktmodellierung

Eine möglichst ganzheitliche Betrachtung aller Aspekte während des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses fordert nicht nur die Anwendung der allgemeingültigen, methodischen Vorgehensweisen, sondern auch ein durchgängiges PLM-Konzept, welches heutzutage ohne die

Rechnerunterstützung im gesamten Produktlebenszyklus nicht mehr möglich ist. Beim PLM handelt es sich um die ganzheitliche Gestaltung und Verwaltung des Produktlebens, wobei alle Aspekte und Einflüsse, die während des Produktlebens auftreten können, möglichst frühzeitig und angemessen berücksichtigt werden sollen [Va09]. Die hierfür notwendigen Daten und Informationen werden in verschiedenen Datenbanken und ihren Systemen in unterschiedlichen Formaten der vielen Teilsysteme, welche den PLM-Prozess unterstützen, abgelegt und zur Verfügung gestellt. Jeder Datenzugriff und -transfer ist aufgrund der oft sehr komplexen IT-Landschaft in der Regel ein speziell eingerichteter und fragiler Prozess [Se13a].

Die Arbeitsvorbereitung, welche die Aufgaben der Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung impliziert, sowie die Erfassung und das Management der Betriebsdaten wird von Teilsystemen unterstützt, die sich je nach historischer Entwicklung im einzelnen Unternehmen in Teilen im System für Produktionsplanung- und -steuerung (PPS), Enterprise Resource Planning (ERP) oder im Manufacturing Execution System (MES) befinden. Die Planung und Entwicklung von Fertigungsprozessen und Produktionsanlagen wird von den Systemen der Fertigungsvorbereitung oder des Industrial Engineerings unterstützt, die zukünftig Gegenstand der sogenannten Digital Factory (DF) sein sollen [Se13a].

Für eine ganzheitliche Beherrschung der Informationskomplexität über den gesamten Lebenszyklus hat sich in den letzten Jahren der Begriff des Systems Lifecycle Managements (SysLM) etabliert. SysLM soll als ein integriertes, informationsgetriebenes Konzept und kein IT-System verstanden werden, welches die PLM-Strategie um eine explizite Betrachtung der frühen Phasen der Produktentwicklung unter Beachtung aller Disziplinen, einschließlich Dienstleistungen und Softwaretools, erweitert. In der Abb. 2-23 wird anhand eines Zwei-Ebenen-Modells nach PAREDIS und EIGNER (vgl. auch [Pa16] und [Ei16]) ein Definitionsvorschlag des SysLM Begriffs dargelegt. SENDLER [Se13b] nutzt diese Definition und bezeichnet SysLM als Mittel zur Beherrschung der Komplexität der industriellen IT-Welt.

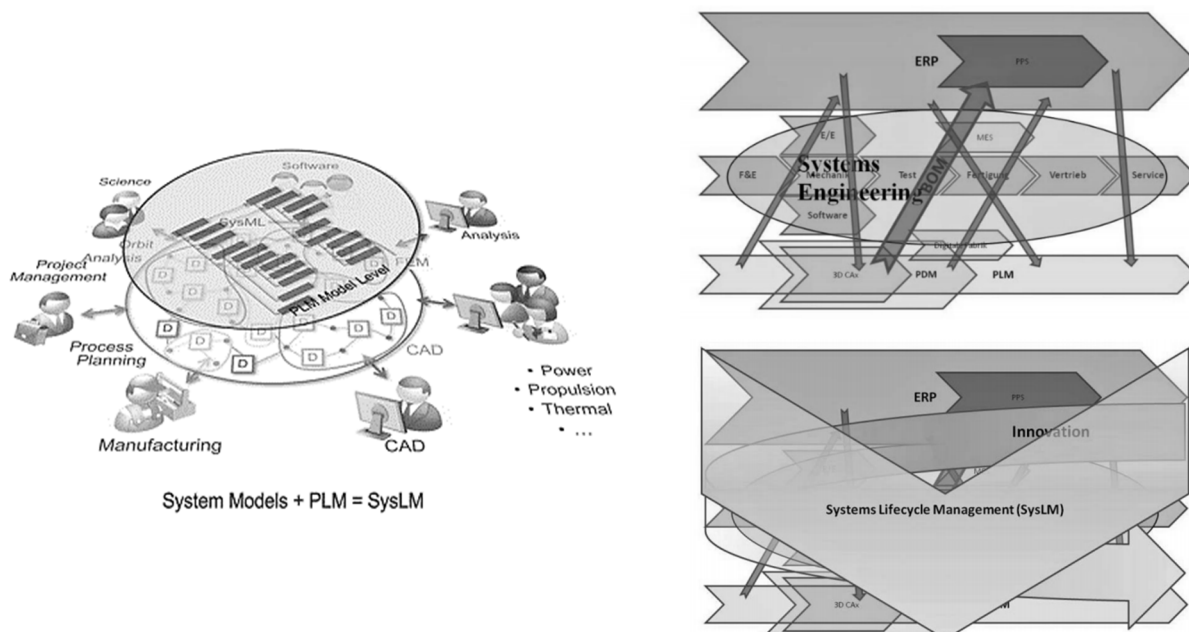


Abb. 2-23: SysLM als Mittel zur Beherrschung der Komplexität der IT-Welt ([Pa16], [Ei16], [Se16])

Das Ziel der SysLM-Strategie ist nicht in erster Linie das Management der Daten, sondern vor allem das Management der Prozesse und der Organisation auf administrativer Ebene und somit die Schaffung der Voraussetzungen für eine bessere, effektivere und effizientere Zusammenarbeit zwischen

den Fachdisziplinen in global agierenden Unternehmen, zwischen der Entwicklung und Produktion, zwischen den Herstellern und Kunden sowie zwischen wissenschaftlicher Forschung und Industrie (vgl. auch [EGZ13], [Ei13], [Se13b]). Dazu sind jedoch neue Methoden, Modelle, Prozessabläufe sowie Werkzeuge notwendig. Betrachtet man diesbezüglich die Prozesskette Konstruktion-Fertigung sind die herkömmlichen Methoden der Entwicklung und Fertigung vor allem durch die Spezialisierungen der einzelnen Fachbereiche geprägt. Gefragt sind jedoch neue Methoden zur gegenseitigen Abstimmung und Einbeziehung des Expertenwissens, um die Zusammenhänge zwischen den nachfolgenden, parallelen oder vorgelagerten Arbeitsschritten besser berücksichtigen zu können. Es fehlen oft die Ansätze zur Modell- sowie Datenverknüpfung und zur Nutzung einer gemeinsamen Wissensbasis. Die in sich abgeschlossenen und sehr gut funktionierenden Prozessabläufe sind oft ein Hindernis für die Entwicklung eines ganzheitlichen Ansatzes. Letztlich sollen die eingesetzten IT-Werkzeuge besser auf die Prozessabläufe zwischen Entwicklung und Fertigung abgestimmt werden. Diesbezüglich müssen die eingesetzten Tools und CAx-Werkzeuge besser miteinander verknüpft werden, um somit die Kommunikation zu vereinfachen. Darunter fallen alle Systeme, welche während der Produktentstehung und Produktion eingesetzt werden (vgl. Abb. 2-24).

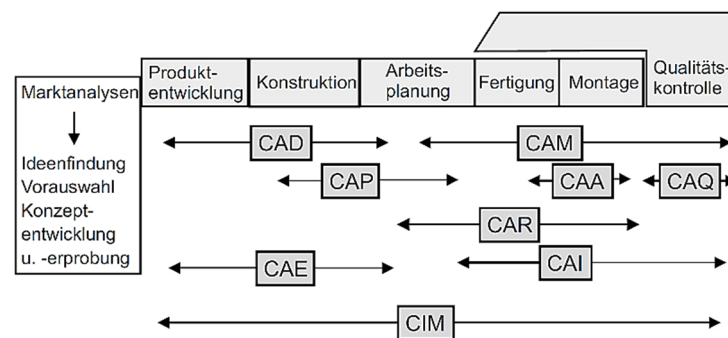


Abb. 2-24: Einsatzgebiete von CAx-Systemen [He11]

Das Resultat des Zusammenwirkens der 3D-CAx-Werkzeuge ist ein virtuelles Produktmodell, das digital schrittweise und prozessbegleitend entwickelt, konstruiert, gefertigt und zusammengebaut wird. Die Bestandteile des virtuellen Produktmodells sind neben der Produktgeometrie die Produktstrukturen, berechnungs-, simulations-, fertigungs-, montagebezogene Informationen, also alle für die weiteren Phasen des Produktlebenszyklus notwendigen Daten und Informationen. Die [VDI2209] bezeichnet den an ein 3D-CAD-System angelehnten Produktmodellierungsprozess als 3D-Produktmodellierung und verdeutlicht, ausgehend von den verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus, an welchen Stellen und in welcher Weise diese Phasen durch die 3D-Produktmodellierung beeinflusst werden können [VDI2209].

erforderliche Elemente mit ihrer Einbaureihenfolge. Die funktionale Absicherung des Entwicklungsergebnisses wird in dieser Phase nicht nur durch den Einsatz von Fertigungssimulationen wie NC-, Spritz-, Gießsimulation unterstützt, sondern immer öfter durch digitale Versuchsmodelle (DMU - Digital Mock-Up), die eine Darstellung und Prüfung der Zusammenbauprozesse ermöglichen. Als Beispiele sind hier Montage-, Demontage-, Sicht- und Kollisionsanalysen zu nennen. DMU erweitert um die Werkzeuge der virtuellen Realität (VR - Virtual Reality) in Form von 3D-Brillen, Caves, VR-Desktops, Powerwalls oder einer Kombination der realen Umwelt mit einem computergenerierten Umwelt (Augmented Reality) ermöglicht es nicht nur, die Montage- und Fertigungsprozesse zu simulieren und zu untersuchen, sondern stellt ein interdisziplinäres Hilfsmittel zur Darstellung, Erprobung, Bedienung, Nutzung und Wartung eines virtuellen Produktes bereit.

Der alleinige Einsatz der CAx-Werkzeuge und die Anwendung der methodischen Vorgehensweisen, wie Simultaneous Engineering, Concurrent Engineering, Collaborative Engineering, Cross Enterprise Engineering oder Frontloading, gewährleistet jedoch nicht die angestrebte Produktivitätssteigerung, solange die einzelnen Phasen nicht in geeigneter Weise verknüpft werden. Ein effizienter Einsatz der 3D-Produktmodellierung und dadurch der 3D-Modelle erfordert eine sinnvolle, assoziative Verknüpfung aller in den nachfolgenden Prozessschritten erzeugten Daten, Informationen und des Wissens.

2.4 Technologien und Methoden des CAD- und CAM-Prozesses

2.4.1 KBE-Technologie

Im rechnerunterstützten Konstruktionsprozess wird die Tendenz beobachtet, immer mehr produktbezogene Informationen und Wissen in das 3D-CAD-Modell zu integrieren. Dadurch wird das 3D-CAD-Modell nicht nur als ein geometrisches Modell, sondern immer mehr als ein zentraler Speicher des konstruktiven Produktwissens angesehen. Aus diesem Grund werden in der Forschung und in der industriellen Anwendung neue Methoden zur Wissensintegration unter Verwendung des 3D-CAD-Modells als Träger der Wissensbasis entwickelt [LiSt04]. Die neuesten Erkenntnisse aus diesem Bereich wurden in der VDI-Richtlinie [VDI5610-2] zusammengefasst.

Betrachtet man jedoch die Entwicklung der CAD-Systeme aus der längeren Zeitperspektive, wird deutlich, welchen Beitrag die CAD-Systemanbieter geleistet haben, um die unstrukturierte, zufallsbedingte Wissensnutzung in eine strukturierte und zielorientierte Ausschöpfung der Wissensressource zu überführen. Es beginnt mit den Grundbausteinen der modernen Technologie (Volumenmodellierung, Parametrik) sowie bidirektionaler Assoziativität und führt weiter über die Feature-Technologie bis hin zur Schnittstellenprogrammierung (API) und wissensbasierter Konstruktion. Diese mittlerweile zur Standard-Ausrüstung professioneller 3D-CAD-Systeme gehörenden Komponenten bauen aufeinander auf und bilden zusammen ein leistungsfähiges Werkzeug zur effizienten virtuellen Produktmodellierung [DaKö06].

Die technologische Basis für die wissensbasierte Modellierung wird in [LiSt04] als eine hierarchische Struktur von Systembausteinen dargestellt, auf denen die Wissenstechnologie der KBE-Module in modernen featurebasierten und parametrischen 3D-CAD-Systeme aufbaut.

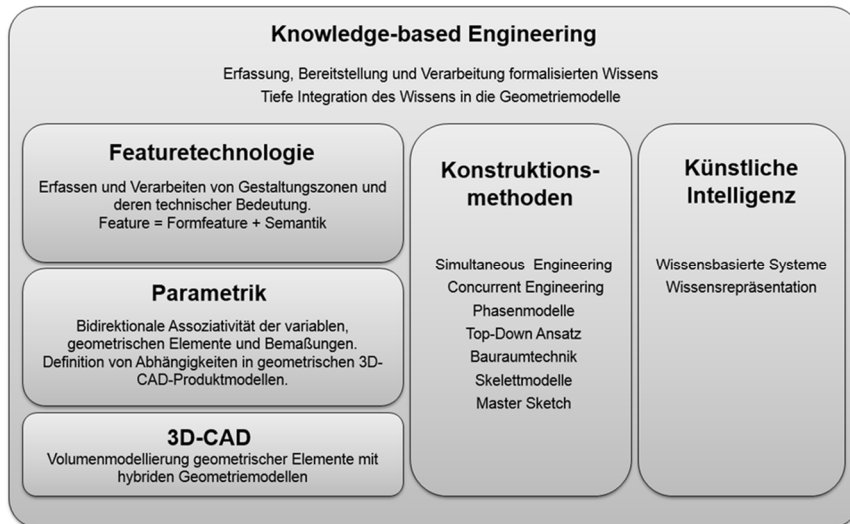


Abb. 2-26: Bausteine der KBE-Technologie nach [LiSt04]

Die KBE-Technologie erweitert die direkte, parametrisch-assoziative und feature-orientierte Produktmodellierung sowie allgemeine Methoden der Konstruktionstheorie um neue regelbasierte Modellierungstechniken, Fachwissen, Regeln, Analyse- und Prüffunktionen, ereignisgesteuerte Routinen sowie anwendungsspezifische Optimierungsprozesse. Somit wird eine neue Betrachtungsweise des Produktentwicklungs- und Produktmodellierungsprozesses dargelegt.

Durch die KBE-Technologie wird der Konstrukteur unterstützt, das von Tag zu Tag neu gewonnene Wissen konstruktionsbegleitend im CAD-Modell zu implementieren. KBE ermöglicht beispielsweise eine automatisierte Generierung von komplexen Geometrien, die nach besonderen Vorschriften und Regeln aufgebaut werden sollen, oder eine automatische Anpassung von Geometrie an neue Umgebungsbedingungen, z. B. bei Konstruktionsänderungen oder Variantenkonstruktionen. Die heutigen professionellen 3D-CAD-Systeme werden zunehmend um KBE-Module oder -Systeme zur Wissensverarbeitung erweitert. Diese Unterscheidung zwischen KBE-Modulen oder -Systemen resultiert aus der Tiefe der Integration von KBE in das jeweilige CAD-System. Es kann grob zwischen Stand-Alone-Systemen, angepassten Systemen und integrierten Systemen unterschieden werden (Abb. 2-27).

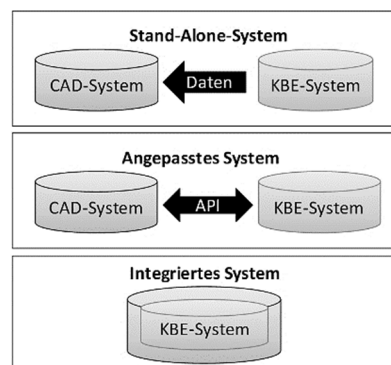


Abb. 2-27: Integration von KBE- in CAD-Systeme nach [Lu09]

Die Erzeugung und Manipulation der Geometrie über die Stand-Alone-Systeme erfolgt mithilfe eines internen, speziell auf die Anforderungen der Problemstellung und des jeweiligen CAD-Systems zugeschnittenen Geometriekerns. Aufgrund der indirekten Kopplung an das CAD-System und der Schnittstellenproblematik wird der Geometriedaten- und Informationsaustausch entweder auf eine

manuelle Übertragung oder spezielle neutrale Form beschränkt. Demzufolge kann die Historie des Geometrieerstellungsvorganges in Form von Features und Parametern sowie Beziehungen nicht abgebildet werden und das angewandte und das generierte Wissen bleibt u. U. nur im KBE-System erhalten. Anders zeigt sich die Situation in den angepassten Systemen. Die Daten und Informationen werden über eine Programmierschnittstelle (API) ausgetauscht. Somit können CAD-systemspezifische Funktionalitäten zur Erzeugung und Manipulation der Geometrie genutzt werden. Jedoch aufgrund des sowohl unterschiedlichen Funktionsumfanges des CAD-Systems selbst als auch seitens der API ist der Zugriff bei der Umsetzung geometrischer Funktionalitäten meist auf Basisfunktionen beschränkt. Die meisten Möglichkeiten der Geometrieerzeugung sowie -manipulation und Wissensintegration weist das ins CAD-System integrierte KBE-System bzw. -Modul wie z. B. das Knowledgeware vom CAD-System CATIA auf.

2.4.2 Feature-Technologie

2.4.2.1 Features und featurebasierte Modellierung

Als Feature wird die Aggregation von Geometrie und/oder Semantik verstanden [Ri95]. Ein Feature beschreibt einerseits immer ein vordefiniertes Gestaltelement und beinhaltet zudem die dementsprechende technische Bedeutung (auch Semantik genannt). Zwischen diesen beiden Elementen herrscht eine Relation [He11] (siehe Abbildung Abb. 2-28).

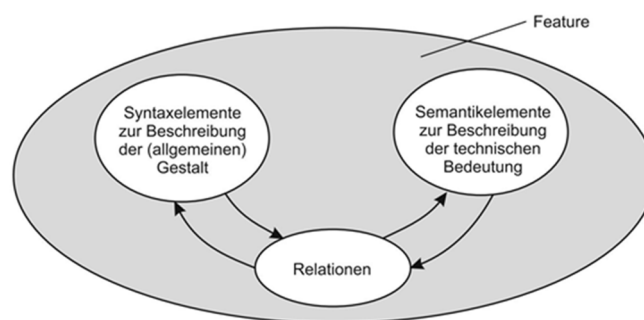


Abb. 2-28: Grundlegender Aufbau und Bestandteile eines Features [He11]

Die in der Semantik enthaltenen Informationen lassen sich in die geometrieorientierte, technologieorientierte und funktionsorientierte Semantik unterteilen. Die funktionsorientierte Semantik umfasst die funktionalen Zusammenhänge, welche zwischen Features innerhalb eines oder mehrerer Bauteile gebildet wurden. Über die geometrieorientierte Semantik lassen sich geometrische Elemente und ihre Beziehungen untereinander klassifizieren. Die technologieorientierte Semantik beinhaltet die Informationen über die Konstruktion und die Fertigung [WiGeKe04].

Features werden häufig als Funktionselement, Fertigungselement, technisches Element oder Konstruktionselement bezeichnet [Va09] und bilden generell die Grundbausteine der featurebasierten Systeme und Modellierung. Sie werden in sog. Feature-Bibliotheken verwaltet und für die Nutzung bereitgestellt mit dem Ziel, durch eine featurebasierte Modellierung zu effizienteren Konstruktions- und Fertigungssystemen zu kostengünstigeren Produkten zu führen [Pa11]. Durch die Wiederverwendung von erprobten Lösungen wird gleichzeitig auch eine Sicherung der Qualität erreicht [He11].

In der Literatur wird oft zwischen Formfeatures, Konstruktionsfeatures und Fertigungsfeatures unterschieden. Formfeatures dienen dem Zweck reiner Geometriemodellierung und besitzen keine Semantik (z. B. Extrusionsfeature, Rotationsfeature, Verbundfeature, Freiformflächenfeature etc.). Konstruktionsfeatures bestehen aus funktional-technologischen Elementen und enthalten zusätzlich

zu den geometrischen auch Informationen über die vom Konstrukteur beabsichtigte Aufgabe dieses Elementes [Ti03]. Diese werden auch als Formfeatures mit weiteren Eigenschaften eingesehen. Diese Eigenschaften können u. a. Informationen aus den Bereichen der Berechnung und Simulation, Arbeitsplanung, Fertigung, Montage und Qualitätssicherung sein [Lu09]. Fertigungsfeatures beinhalten ebenfalls neben den geometrischen Informationen weitere semantische Informationen und nicht geometrische Eigenschaften, die für die weiteren Prozesse der Fertigung genutzt und ausgewertet werden können [Va09], [Pa11]. Semantische Informationen, die Bezug auf die Fertigungseigenschaften nehmen, können zur Erstellung der NC-Verfahrwege und späteren Simulation und Steuerung des Fertigungsprozesses verwendet werden [Va09], [Pa11], [Va14].

Die Feature-Technologie trat in den vergangenen Jahrzehnten immer weiter in den Vordergrund (vgl. die VDI-Richtlinie [VDI2218]). Die vielfältigen Entwicklungen von funktionsorientierten, konstruktions- oder entwurfsbezogenen Feature-Konzepten streben nach dem übergeordneten Ziel der Beschleunigung und Parallelisierung des Produktentstehungsprozesses und die Unterstützung der methodischen Konzepte des Simultaneous und Concurrent Engineerings [Va09]. Um das featurebasierte Modellieren noch effizienter zu gestalten, werden auch anwendungsspezifische, benutzerdefinierte Features (UDF) definiert und eingesetzt [Va09], [Pa11], [Va14]. Somit können unternehmensspezifische Konstruktionselemente erfasst, bereitgestellt und verwaltet werden. In diesem Kontext sei auf die entwickelten höherwertigen Features und Konstruktionsobjekte mit ihren Konzepten und Methoden von Hoffman [Ho01] und Kesselmans [Ke14] hingewiesen, welche sich den Aspekten der Gestaltung und Berechnung und ihren Verknüpfungen während der Neu- und Variantenkonstruktion widmen.

Ein featureorientiertes Konzept, welches eine widerspruchsfreie und formalisierte Kommunikation zwischen den Bereichen der Konstruktion und Fertigung unterstützen soll, zielt in die Richtung der „selbstständigen“ Übersetzung von CAD-Informationen in passende Fertigungsanweisungen, was beispielsweise zu einer automatisierten NC-Programmierung führen soll [Pa11] [He11]. Dabei sind die in den Systemen vorhandenen Features und UDFs meistens schon mit befüllten oder zu befüllenden Wissensbasen ausgestattet [Pa11]. Die erwähnten „selbstständigen“ Übersetzungen basieren nicht nur auf den bekannten Methoden der Feature-Erkennung und Feature-Transformation, sondern auch auf den in den letzten Jahren vorangetriebenen Weiterentwicklungen der geometrie- und technologieorientierten Feature-Semantik. Dazu zählt beispielsweise das PMI-Konzept (Product Manufacturing Information) von Siemens PLM Software (vgl. auch [Si16], [Ja16]), dessen Idee und Ziel die Verknüpfung der Anmerkungen zu den 3D-Modellen und den dazugehörigen Geometrieelementen, -bereichen oder Features mit den Produktfertigungsinformationen ist. PMI-Objekte umfassen Informationen wie z. B. geometrische Bemaßungen und Toleranzen (Form und Lage), Textnotizen, Oberflächenangaben und Werkstoffdaten für die Fertigung. Die Verknüpfung zwischen den 3D-Anmerkungen und beispielhaft der NC-Programmierung kann anhand der durch die Feature-Erkennung erkannten Features und die dazugehörigen Informationen aus den PMIs realisiert werden. Somit können einige bestimmenden Attribute wie Toleranzen und Oberflächenbearbeitungen, welche die nachgelagerte Auswahl von Fertigungsvorgängen beeinflussen, gelesen und verwendet werden. Diese Informationen können auch die Auswahl der Bearbeitungsmethode durch den Vergleich der Bearbeitungsdatenbank gespeicherten Kriterien begünstigen. Beispielhaft kann eine geringe Toleranz ein bestimmtes Endbearbeitungsverfahren und ein spezielles Werkzeug erfordern, welches dann anhand von entsprechenden Algorithmen dem Endbearbeitungsverfahren zugeordnet

und für dieses Feature festgelegt wird. Mithilfe von PMIs können zudem Aufgaben wie die Überprüfung von Form- und Lagetoleranzen (entsprechend den Form- und Lage-Toleranzstandards von ISO und ASME⁴) automatisiert programmiert werden.

Auf diese Weise trägt schon während der Konstruktion das aufbereitete und intelligente 3D-Modell dazu bei, dass die nachgeschaltete NC-Programmierung und Bearbeitung beschleunigt werden kann. Bei der erstmaligen Fertigung eines Teils können die Wahrscheinlichkeit von Interpretationsfehlern und damit verbundene höhere Kosten oder ggf. geringere Produktivität und Qualität beeinflusst werden. Durch die Datenwiederverwendung können alle angeschalteten Prozesse und der Produktlebenszyklus von der Verwendung von PMIs den Nutzen ziehen und profitieren. Die PMIs sind nicht nur innerhalb eines CAD-CAM-Systems lesbar, sondern auch nach der Konvertierung des 3D-Modells in ein JT-Format in anderen Systemen. Diese sich damit eröffnenden Möglichkeit zur Automatisierung des Fertigungsprozesses kann ein weiterer Schritt in Richtung Industrie 4.0 sein. Nach der Ausarbeitung von geeigneten Industriestandards (ISO 16792⁵, ASME Y14.41⁶ und JEITA⁷) lässt die Verwendung von PMIs eine vollständige Dokumentation von Produkt- und Fertigungsinformationen zu, sodass das in der Zukunft das Erstellen von 2D-Zeichnungsableitungen abgelöst werden könnte und zu einem papier- und zeichnungslosen Fertigungsprozess führen kann. Es gäbe folglich eine enorme Zeit-, Kosten- und Aufwandsersparnis, da eine manuelle Herstellung und bei einer Änderung eines Teils die Aktualisierung aller mit dem Teil zusammenhängenden Zeichnungen und Dokumente nicht mehr notwendig wäre.

2.4.2.2 Feature-Erkennung und Feature-Transformation

Die Feature-Erkennung und Feature-Transformation gehören mittlerweile zu den Standardfunktionen der featurebasierten Systeme, jedoch ist der Funktionsumfang vom System zu System unterschiedlich stark. Das ist auf unterschiedliche Konzepte und Möglichkeiten der Implementierung innerhalb und zwischen verschiedenen Softwaresystemen zurückzuführen. Grundsätzlich jedoch greifen beide Funktionen auf die festgelegten Feature-Bibliotheken und dort enthaltenen Features und ihre Eigenschaften zurück. Über die Feature-Erkennung wird versucht, die Bereiche eines CAD-Modells zu identifizieren, welche im gewünschten Kontext eine neue zusammengehörige Einheit bilden sollen. Somit können beispielsweise aus den geometrischen Eigenschaften die Fertigungsfeatures erkannt werden. Technologische Informationen können dann ergänzt oder (im Fall der automatischen Feature-Erkennung) anhand von bereits vorhandenen Parametern erfasst werden. Die Feature-Erkennung stößt für komplexe Bauteilgestalten an ihre Grenzen, sodass eine vollständige Repräsentation erschwert wird [VDI2218]. Mit der Feature-Transformation wird versucht, die Feature-Eigenschaften in andere Eigenschaftsklassen zu überführen (z. B. Überführung funktionaler in fertigungsrelevante Eigenschaften). Dieser Prozess wird auch Feature-Mapping genannt. Eine weit verbreitete Methode des Feature-Mapping ist z. B. die Nutzung von Farbtabelle (siehe Abb. 2-29).

⁴ ASME: American Society of Mechanical Engineers.

⁵ ISO 16792: Die Norm für Datenpraktiken zur digitalen Produktdefinition. Bei dieser Norm handelt es sich um den internationalen Standard zur Beschriftung von 3D-Modellen.

⁶ ASME Y14.41: Norm für die digitale Produktdefinition in 3D. Bei dieser Norm handelt es sich um den amerikanischen Standard zur Beschriftung von 3D-Modellen [ASMY14.41].

⁷ JEITA: Richtlinien zur Beschriftung von 3D-Modellen. Bei diesen Richtlinien handelt es sich um den Standard der Japanese Electronics and Information Technology Industries Association zur Beschriftung von 3D-Modellen.

Bearbeitungstyp	Bemerkung	CATIA V5	RGB- Werte
Methodenplanabhängige Bereiche / Kontur-Bearbeitung im Vorrichtung- und Anlagenbau	Alle Bearbeitungen, die nicht nach Solid-Modell, sondern nach gesonderten Datensatz durchgeführt werden / Bearbeitung bauteilbezogener Flächen nach Solid- oder Flächendatensatz	Oliv grün	175,255,175
Feinstbearbeitung	Schleifen etc. oder Sonderpassungen	Elfenbein	255,255,175
Schlichten	Feinbearbeitung (Zusatzangaben siehe Arbeitsanweisungen)	Rosa	255,175,175
Schruppen	Grobbearbeitung	Rotbraun	095,000,000
Passbohrung H11	Auch Sonderfräsbearbeitung	Blau	095,095,175
Passbohrung H8	Auch Sonderfräsbearbeitung	Lila	095,000,095
Passbohrung H7	Auch Sonderfräsbearbeitung	Blau	000,000,255
Passbohrung H6	Auch Sonderfräsbearbeitung	Dunkelblau	000,000,095
Gewinde	Metrisch Rechtsgewinde nach DIN / ISO	Gelb	255,255,000
Feingewinde	Metrisch Feingewinde (rechts) nach DIN / ISO	Hellorange	255,175,000
Spirallock / Spezialgewinde	Alle sonstigen Spezialgewinde	Orange	255,095,000
Sonderbohrung/ Stufenbohrung	Komplexe Bohrungen, Kombinationen von Bohrungen	Magenta	255,000,255
Freibohrung / einfache Bohrung	Durchgangslöcher usw., sonstige Ansenkungen	Cyan	000,175,175
Änderungsbereiche	Sphäre oder Solid mit Transparenz 192	Hellblau	000,127,255
ZSB- Bohrungen	Bearbeitungen im Zusammenbau	Weiß	255,255,255

Abb. 2-29: Farbtabelle für Feature-Mapping

Der Vorteil dieser recht einfachen Methode ist die Tatsache, dass die Farbwerte bei der Konvertierung in bestimmte CAD-Datenaustauschformate erhalten bleiben. Im CAM-System werden die Farben beim Einlesen der CAD-Daten automatisch erkannt und somit können den eingefärbten Geometriebereichen bestimmte Bearbeitungsverfahren und -schritte (wie Schlichten, Schruppen, Schleifen, Bohren etc.) zugewiesen werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, Änderungsbereiche farblich zu kennzeichnen. Auf diese Weise kann im CAM-System vermieden werden, dass versehentlich Flächen bearbeitet werden, die nicht bearbeitet werden dürfen. Es handelt sich hierbei um eine bewährte Methode, die u. a. von der Automobilindustrie eingesetzt wird. Somit kann ein Konstruktionsfeature in ein Fertigungsfeature transformiert werden, wenn ein korrespondierendes Feature vorhanden ist. Ist dieses nicht vorhanden, wird eine Benutzerinteraktion nötig [VDI2218]. Eine klare Abgrenzung zwischen der Feature-Erkennung und -Transformation ist nach HOFFMANN [Ho01] nicht ratsam, da die Eigenschaften eines Features durch entsprechende Algorithmen erkannt und weiter aufbereitet werden können.

2.4.3 Softwaretools zur Überprüfung der CAD-Modelle

Für die Überprüfung von 3D-CAD-Daten gibt es eine Vielzahl verschiedener Tools und Anwendungen. Betrachtet man jedoch eine Gruppe von Programmen, welche explizit die Fertigungsgerechtigkeit der virtuellen 3D-Modelle sicherstellen sollen, so verringert sich die Auswahl erheblich. Dies verdeutlicht den geringen Entwicklungsstand, aber im Umkehrschluss auch das hohe Entwicklungspotenzial in diesem Teilbereich. Grundsätzlich können jedoch auf dem Markt erhältliche Softwarelösungen zur Überprüfung von 3D-CAD-Daten nach der jeweiligen Kernfunktion zwischen drei verschiedenen Typen unterschieden werden, wobei die Grenzen zwischen den Kategorien häufig fließend sind (siehe Abb. 2-30).

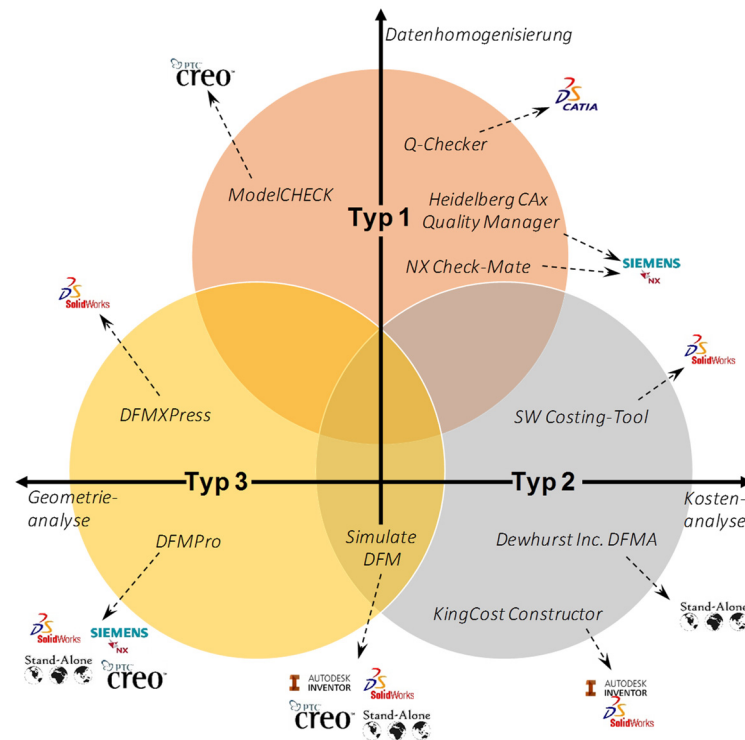


Abb. 2-30: Softwaretools zur Überprüfung 3D-CAD-Modelle

Beim Typ 1 liegt die Kernaufgabe der Software in der Sicherstellung der Einhaltung unternehmensinterner CAD-Standards sowie der Vorgaben zur Modellierungsstrategie. Das Ziel ist, eine Homogenität in der Datenstruktur z. B. nach VDA-Empfehlung [VDA4955] zu gewährleisten, die Handhabung zu vereinfachen und vor allem die Datenqualität abzusichern. Ein typisches Einsatzbeispiel der Softwaretools ist die Konvertierung von Daten in ein neutrales Datenformat zum Zwecke des CAD-CAM-Datenaustausches. Durch die Verwendung eines bestimmten Modellaufbaus (z. B. nach VDA-Empfehlung [VDA4950]) kann der Konvertierungsvorgang automatisiert und ohne nachträgliche Überprüfungen hinsichtlich der Informationsverluste erfolgen. Neben der Gewährleistung einer bestimmten Datenstruktur lassen sich mit Werkzeugen dieses Typs auch ausgewählte Geometrieprüfungen durchführen sowie die Verwendung von Normwerten sicherstellen. Sie sind diesbezüglich jedoch in ihrer Leistungsfähigkeit stark beschränkt und haben nicht den Anspruch einer allumfassenden Geometrieprüfung in Bezug auf Fertigungsgerechtigkeit. Software dieses Ansatzes ist für jede große CAD-Plattform erhältlich, beispielsweise Q-Checker der Fa. Transcat für die CATIA-Plattform, der CAX Quality Manager der Fa. Heidelberg für NX oder NX Check-Mate in Siemens NX. Der Hersteller PTC stellt dem Anwender für seine Plattform Creo das interne Tool PTC ModelCHECK zur Verfügung. In SolidWorks kann die Datenqualität durch mehrere einzelne, nicht unter einem Namen zusammengefasste Tools sichergestellt werden.

Software des Typs 2 ist in ihrem Arbeitsbereich wesentlich fertigungsspezifischer. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Kostenoptimierung von Produkten im Sinne der Zielkostenanalyse. Das Ziel ist, dem Konstrukteur zu jeder Entscheidung die dazugehörigen Kostenauswirkungen aufzuzeigen und somit die optimale Lösung zu finden. Hierzu ist manchmal nicht einmal ein 3D-Modell notwendig. Der amerikanische Hersteller „Boothroyd Dewhurst Inc.“ [Bo15] bietet mit seinem Kostenanalysetool namens DFMA die Möglichkeit, die Kostentreiber eines Teiles oder einer Baugruppe mit oder ohne ein 3D-Modell zu ermitteln und die Herstellkosten durch geschickte Anpassung zu verringern. Für die Analyse eines Teiles oder eines Produktes ist die Eingabe verschiedener Informationen erforderlich, mithilfe der die Kostentreiber ermittelt und die Herstellkosten abgeschätzt

werden können. Dies erfolgt beispielsweise mit der Costing-Erweiterung in der CAD-Plattform SolidWorks, welche eine grobe Abschätzung der Herstellkosten simultan zur Konstruktion auf Basis von Material- und Produktionsdaten ermöglicht. Das Costing-Tool unterteilt sich in die Kostenabschätzung von Blechteilen (Sheet Metal Costing) und von Teilen, die anfangs als Materialblock oder -platte vorliegen und durch Fräsen, Bohren, einen Wasserstrahl oder Plasmaschneiden auf die gewünschte Form zugeschnitten werden (Machining Costing). Weitere Verfahren wie Drehen, fortlaufendes 3-Achsen-Fräsen oder Spritzgießen werden nicht unterstützt. Eine Lösung, welche neben der Kostenanalyse auch die Datenverwaltung übernimmt, um so durch die Einbeziehung aller Unternehmensabteilungen an der Kostenberechnung eine möglichst genaue Kostenabschätzung zu erzielen, wird für CAD-Plattform SolidWorks und Inventor von der Fa. prolim engineering GmbH [So15] mit den Tools: KingCost-Analyser und -Constructor angeboten. Der KingCost-Analyser übernimmt hierbei die Datenverwaltung und ermöglicht das Einpflegen von Preisen und Lieferanteninformationen durch verschiedene Unternehmensabteilungen. Hierdurch steht allen Unternehmensbereichen sowie autorisierten Kunden eine schnelle und realitätsnahe Kostenabschätzung zur Verfügung. Der KingCost-Constructor erfüllt die Funktion des zuvor beschriebenen SolidWorks Costing-Tools und ermöglicht dem Konstrukteur anhand von Material- und Geometriedaten eine erste Kostenanalyse. Auch wenn die Fertigungsgerechtigkeit immer in Verbindung mit Kostengerechtigkeit betrachtet werden muss, beziehen die Softwaretools des zweiten Typs wichtige Gesichtspunkte nicht mit ein. So werden bei der Kostenanalyse nur die in der Datenbank hinterlegten Kosten der einzelnen Arbeitsschritte sowie die Materialkosten addiert. Fertigungstechnische Unmöglichkeiten, wie z. B. Frästeile mit Hinterschneidungen, werden nicht erkannt. Modellierungsfehler dieser Art führen abhängig vom Korrekturzeitpunkt zu sehr hohen Kosten, da häufig eine komplette Überarbeitung der Geometrie notwendig ist.

Die Erkennung fehlerhafter Geometriebereiche aus fertigungstechnischer Sicht wird möglich mit dem Einsatz der Softwaretools des dritten Typs. Die Funktionsweise gleicht hierbei der in der CAD-Umgebung eingesetzten Software des zweiten Typs. Auch hier verknüpft ein Algorithmus Modellkomponenten mit einem Fertigungsschritt, um daraufhin die fertigungsbestimmenden Geometriedaten auszulesen. Die Prüfalgorithmen sind an das spezifische Fertigungsverfahren gebunden. Der Unterschied der beiden Ansätze liegt in der Datenauswertung. Bei Softwaretools des Typs 2 wird aus den geometrischen Informationen, wie den Abmessungen und den semantischen Informationen, wie dem Material, eine Kostenabschätzung durchgeführt. Beim Typ 3 hingegen erfolgt nach dem Auslesen der Daten ein Abgleich mit den vom Anwender hinterlegten Sollwerten. Dieses Prinzip ermöglicht das Programmieren von fertigungsverfahrensabhängigen Regeln und im Falle eines Verstoßes das Ausgeben eines Warnhinweises sowie die Lokalisierung der fehlerbehafteten Geometriekomponente mit möglichen Änderungsvorschlägen.

Ein Beispiel für Softwaretools, die zum Großteil dem dritten Typ zugeordnet werden können, ist das Simulation DFM [Au15], welches für die Plattformen Inventor, SolidWorks, Creo sowie als plattformübergreifende Standalone-Version erhältlich ist. Es handelt sich hierbei um ein Analysetool ausschließlich für Kunststoffteile. Dennoch stellt Autodesk mit diesem Tool dem Anwender eine innovative Lösung zur Verfügung, deren einzigartige Ansätze auch auf andere Herstellungsverfahren und Materialien übertragen werden könnten. Besonders hervorzuheben ist die Rückmeldung zu dem Einfluss jedes konstruktiven Schrittes in Bezug auf fertigungstechnische Umsetzbarkeit oder Fertigungskosten.

Ein weiteres Beispiel für ein Geometrieanalysewerkzeug ist die DFMPPro-Software der Fa. Geometric Ltd. [Ge15], welche mit den CAD-Systemen SolidWorks, NX, Creo und als Standalone-Version verwendet werden kann. DFMPPro ist ein leistungsstarkes Programm, welches dem Anwender den Zugriff auf Teile des Programmcodes und somit die Programmierung von individualisierten Custom-

Checks ermöglicht. Eine vollständig ins CAD-System implementierte Version des Tools ist in SolidWorks unter dem Namen DFMXpress zu finden. Dort kann zusätzlich zu der Überprüfung der Werkstückgestaltung die Vollständigkeit von Fertigungsangaben wie Oberflächengüte und Toleranzangaben sichergestellt werden. Jedoch ist das Programmieren von individualisierten, unternehmensspezifischen Regeln dort nicht möglich, was DFMPPro zu einem wesentlich flexibleren Werkzeug macht [De08].

2.4.4 Rechnergestützte Fertigung

Heutzutage bieten CAM-Systeme die Möglichkeit der 2D-, 2 ½-D und 3D-Bearbeitung an. Bei der Angabe der Dimension beziehen sich hierbei einige Hersteller von CAM-Systemen auf Bahnsteuerung einer Maschine und nicht auf die Darstellung der Bauteilgeometrie. So bedeutet 3D-Bearbeitung in Bezug auf ein CAM-System, dass mindestens drei Achsen einer Werkzeugmaschine gleichzeitig verfahren und interpoliert werden können. Jedoch um Freiformflächen oder 3D-Konturen zu fertigen werden zusätzlich Dreh-, Schwenk- und Nebenachsen benötigt um beispielsweise durch Schwenken einer Frässpindel oder eines Aufspanntisches ein Werkzeug in jedem beliebigen Winkel an das Werkstück heranführen zu können. Die Werkzeugmaschine wird als 5-Achs-Maschine bezeichnet. 2 ½-D bedeutet, dass maximal zwei beliebige Achsen einer Werkzeugmaschine gleichzeitig und in unterschiedlichen Ebenen bewegt und interpoliert werden können. Bei der 2D-Bearbeitung hingegen können lediglich zwei Achsen simultan verfahren werden. Die dritte Achse dient als Zustellachse und kann nicht mit einer anderen Achse interpoliert werden [KiRo15].

Durch die Forderung nach geringeren Durchlaufzeiten sowie einer hohen Anzahl an sich auf dem Markt befindlichen, maschinenspezifischen Steuerungen werden die heutigen NC-Programme⁸ nahezu durchgängig computergestützt erstellt. Dies wird durch eine zunehmende Werkstückkomplexität begründet [KiRo15]. Die computergestützte Programmierung unterscheidet sich von der manuellen Programmierung vor allem dadurch, dass nicht mehr die einzelnen Werkzeugbewegungen, sondern die Konturen und Formen, entsprechend dem fertigen 3D-Modell, des Fertigteils eingegeben werden. Bei der manuellen Programmierung werden die Verfahrwege des Werkzeugs im Satzformat nach [DIN66025-1] und [DIN66025-2] in Abhängigkeit von der eingesetzten Maschinensteuerung festgelegt. Die Aufgabe setzt neben den mathematischen Kenntnissen das fertigungstechnologische Wissen voraus. Im Zuge der manuellen Programmierung müssen u. a. die vom Werkzeug und dem zu spanenden Werkstoff abhängigen Werte wie der Vorschub, die Drehzahl und die maximale Spantiefe ermittelt werden. Die manuelle NC-Programmierung ist folgerichtig anfällig für Programmierfehler, die in der Regel erst an der Maschine erkannt werden. Als wichtigstes Ziel der NC-Programmierung wird jedoch die Erzeugung eines fehlerfreien und somit sofort verwendbaren Programms verstanden [KiRo15]. Da CAM-Systeme in der Lage sind, technologische Werte abzuspeichern und automatisiert zu nutzen, können über eine angebundene Materialdatenbank und das im CAM-System ausgewählte Werkzeug die Schnittwerte automatisch berechnet werden. Diese lassen sich wiederum in sog. Fertigungs- bzw. Bearbeitungsschablonen für die Fertigung abspeichern. Des Weiteren kann die Bearbeitungsreihenfolge für die Fertigung bestimmter Geometrie wie beispielsweise Taschen, Nuten oder Bohrungen in einer Bearbeitungsschablone hinterlegt werden. Dies verkürzt die NC-Programmierung von wiederkehrenden oder ähnlichen Geometrien. Nach der Zuweisung der entsprechenden Bearbeitungsschablonen der Geometrie sind die heutigen CAM-Systeme in der Lage auf Basis der integrierten Fertigungsdaten, -informationen

⁸ NC-Programm übernimmt die Steuerung einer CNC/NC-Maschine. Es enthält alle Informationen zur Bewegung der Achsen. Die numerische Steuerung arbeitet die Informationen aus den einzelnen Datensätzen nacheinander ab. Der international genormte Code ist nach einer ISO-Empfehlung in der DIN 66025 festgehalten und unter der Bezeichnung CL-DATA (Cutter-Location DATA) bekannt [He11].

die Verfahrenswege für die Werkzeuge automatisch zu bestimmen. Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der Neutralität des erzeugten Programms. Nach der Fertigstellung des Programms im CAM-System entsteht eine neutrale CLDATA-Datei. Ein Anpassungsprogramm, der sogenannte Postprozessor, passt das neutrale Programm anschließend an die maschinenspezifische Steuerung an. Für den NC-Programmierer bedeutet dies, dass er mit nur einem CAM-System eine Vielzahl von Werkzeugmaschinen ansteuern kann und nicht, wie bei der manuellen Programmierung üblich, auf die Steuerungseinheit einer Maschine spezialisiert ist [KiRo15]. Die wesentlichen Arbeitsschritte und damit die erforderlichen Parameter zur Erstellung eines NC-Programmes sind:

- Festlegung der erforderlichen Fertigungsschritte,
- Auswahl von Spannmitteln und Werkzeuge,
- Ermittlung der technologischen Daten wie bspw. Schnittdaten in Abhängigkeit des verwendeten Werkstoffes,
- Ermittlung der geometrischen Daten, die zur Berechnung der Koordinaten für die Verfahrensbe-
wegung benötigt werden.

Neben einer reinen Fertigungssimulation bieten CAM-Systemen auch eine mathematisch und/oder grafisch basierte Kollisionsprüfung an. Durch die Kollisionsprüfung können neben Schäden am Roh-
teil bzw. Produkt auch kostspielige Schäden an der Fertigungsmaschine selbst vermieden werden [KiRo15]. Einige CAM-Systeme bieten zusätzlich zu jedem Zeitpunkt einer Simulation eine Restma-
terialdarstellung an und verfügen über die Funktion, die unfertige Produktgeometrie in ein CAD-
Datenmodell zu exportieren. Die auf diese Weise generierten CAD-Datenmodelle können u. a. für aus-
stehende Fertigungsschritte auf weiteren Werkzeugmaschinen genutzt werden. Eine zeitintensive
Erfassung des Restmaterials kann auf diesem Weg umgangen werden [He11].

2.4.5 CAD-CAM-Kopplung

CAD-CAM-Systeme stellen das Bindeglied zwischen Konstruktion und Fertigung dar. Die Verknüp-
fung der beiden Bereiche führt nach [He11], [VWS94] zu einer Vielzahl von Vorteilen wie z. B.:

- Einbinden von praxisbezogenem Fertigungs-Know-how in den Designprozess,
- Vermeidung möglicher Fehler in der Dateneingabe,
- verbessertes Fertigungsdatenmanagement,
- verbesserte Planung von Workflow und Fertigungsprozessen,
- Reduktion der Fertigungskosten,
- Steigerung der Profitabilität.

Eine wichtige Bedeutung kommt dabei der Interaktion zwischen Produktentwicklung, Arbeitspla-
nung, Fertigung und Qualitätssicherung zu.

Die heutigen Tendenzen zur Realisierung einer durchgängigen CAD-CAM-Prozesskette zielen darauf
ab, CAD-Systeme stärker in die NC-Programmerzeugung einzubinden. Zum Erreichen dieses Zieles
ergeben sich nach [He11] drei unterschiedliche Kopplungsvarianten (vgl. Abb. 2-31). Diese sind:

- die Nutzung eines einzigen Systems, welches CAD und NC vereint. In dieser Variante haben sämt-
liche Features direkten Zugriff auf einen internen Datenspeicher.

- Die zweite Variante unterscheidet sich von der ersten nur darin, dass eine maschinenneutrale Steuerungsinformation erzeugt wird und anschließend noch ein externer Postprozessor benötigt wird.
- Die dritte Variante verbindet CAD und NC über geeignete neutrale Datenschnittstellen. Hierbei wird versucht, die im CAD-System erstellten Geometrieinformationen oder andere produktbeschreibende Daten zu nutzen und eine erneute Eingabe dieser Daten in das NC-Programmiersystem zu vermeiden.

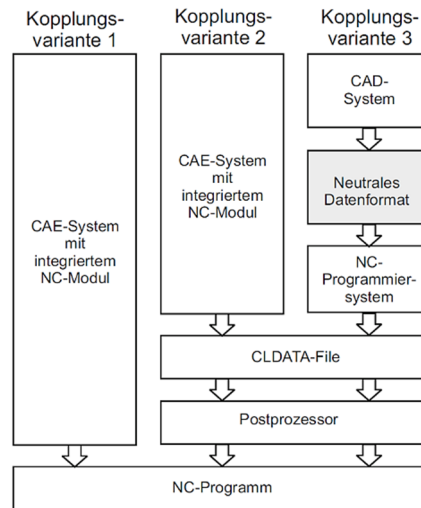


Abb. 2-31: CAD/NC-Kopplungsvarianten [He11]

Wenn CAD- und CAM-Systeme jeweils als Insellösung genutzt werden, kann es sowohl während des Geometrieexports als auch des -imports über eine neutrale oder spezielle Datenschnittstelle (Formate mit Datenkonvertierung) zu Geometrieabweichungen kommen. Dies führt dazu, dass die im CAD-System bereits vorhandenen Informationen im Nachfolgeprozess aufwendig nachgepflegt werden müssen. Wird dagegen bei integrierten CAD-CAM-Systemen eine direkte Geometrieübergabe über ein natives Format (ohne Datenkonvertierung) genutzt, können die o. g. Fehler vermieden werden. Auf diese Weise lassen sich in der Konstruktion bereits erste Fertigungsinformationen, z. B. zu den einsetzbaren Werkzeugen oder den zu verwendenden Werkzeugverfahrwegen, hinterlegen. Ein weiterer Nutzungsvorteil besteht in der Möglichkeit, die Prozesszeiten nicht nur zu verkürzen, sondern auch die Anforderungen der nachgeschalteten Prozesse in möglichst frühen Phasen der Produktentwicklung zu berücksichtigen. Innerhalb der Arbeitsplanung kann der Fertigungsvorbereiter das 3D-Produktmodell, basierend auf seinem impliziten Erfahrungswissen, mit weiteren Informationen, wie den realisierbaren Schnittgeschwindigkeiten und Schnitttiefen, anreichern.

Auf dem Markt existiert eine große Vielzahl von CAD-CAM-Lösungen [PL14], welche nach den Herstellerangaben in der Lage sind, einen reibungslosen Datenaustausch zu gewährleisten. Ein reibungsloser Datenaustausch zwischen verschiedenen Abteilungen innerhalb eines Unternehmens spielt heutzutage eine zentrale Rolle. Durch die Fremdvergabe von Fertigungsaufträgen oder den Einkauf anderweitiger Servicedienstleistungen rückt auch der Datenaustausch zwischen Unternehmen immer stärker in den Vordergrund. Um einen fehler- und verlustfreien Datenaustausch gewährleisten zu können, werden standardisierte Schnittstellen benötigt. Eine Realisierung einer standardisierten Schnittstelle für den Einsatz von CAX-Systemen ist aufgrund der Vielfalt an Systemen und den damit einhergehenden nativen Schnittstellen äußerst schwierig. Verfügen zwei Systeme innerhalb eines Informationsflusses nicht über die gleichen nativen Schnittstellen, gehen in der Regel bei der Konvertierung des Datenformates in ein Austauschformat einige Informationen

verloren. Dies hängt bei CAD-Systemen beispielsweise damit zusammen, dass die Leistungsfähigkeiten zweier CAD-Systeme in der Regel stark voneinander abweichen und auf unterschiedlichen Modellierkernen aufbauen. Da sich viele Unternehmen hinsichtlich der Fremdvergaben jedoch ungern an einen einzigen Anbieter binden wollen, der die gleichen Systeme verwendet, werden häufig systemneutrale Datenformate bevorzugt. Jedoch führt der Datenaustausch über eine neutrale Schnittstelle meist zu Informationsverlusten [Va09] (vgl. auch Abschnitt 2.5.1). Das Ziel muss sein, einen möglichst verlustfreien und reibungslosen Austausch von Daten zwischen CAD-CAM-Systemen zu erreichen.

2.5 Technologien und Methoden des Daten- und Informationsmanagements

2.5.1 Daten- und Informationsaustausch

Als besondere Herausforderung des Informations- und Wissensmanagements lässt sich der Austausch von Daten, Informationen und Wissen sowie über die Abteilungs- und Unternehmensgrenzen nennen. Dieser Austausch erfolgt in einem bestimmten Format und mittels einer geeigneten Schnittstelle. Ein Datenformat bezeichnet eine spezifische Syntax und Semantik für das digitale Abspeichern von Informationen für ein spezielles oder allgemeingültiges Anwendungsfeld [FLL11]. Eine Schnittstelle ist nach [Va09] ein Gebilde von Regeln, Vereinbarungen und Bedingungen, die dem Informationsaustausch zwischen zwei oder mehreren miteinander kommunizierenden Systemen oder Systemkomponenten dient. Dabei spielt es keine Rolle, wie die notwendigen Informationen erzeugt wurden bzw. verwendet werden. Zu beachten ist, dass nur solche Informationen übertragen werden können, die in allen beteiligten Systemen über ein vergleichbares Datenformat verfügen. Beim Austausch von Daten werden nach [ERZ14] die Datenschnittstellen zwischen direkten oder indirekten Schnittstellen unterschieden. Direkte Schnittstellen zeichnen sich dadurch aus, dass zur Übertragung von Informationen keine Datei erstellt werden muss. Die Informationen gelangen „direkt“ ohne Zwischenformate ins Zielsystem. Die Informationen bei einer indirekten Schnittstelle werden hingegen in eine Datei ausgeschrieben und an das jeweilige System gesendet. Dort kann die Datei geladen und gegebenenfalls durch Modifikation verwendet werden [ERZ14]. Eine weitere Einteilung der Schnittstellen erfolgt im Hinblick auf die Verwendbarkeit und Einsehbarkeit des Aufbaus einer Datenstruktur. Unterschieden werden proprietäre Daten, welche auch als native Datenformate bezeichnet werden, sowie die offenen Daten, welche auch als neutrale Datenformate bezeichnet werden. Offene Datenformate stehen für die freie Verfügbarkeit der Datenstruktur, die beliebig genutzt und verändert werden darf. Sie weisen keine Applikationsbindung auf und werden nicht nur zum Datenaustausch, sondern auch direkt in Programmen zum Speichern der Objekte und dazugehörigen Daten, Informationen und Zusammenhänge genutzt. Im Gegensatz zu nativen Dateiformaten sind sie häufig genormt und legen systemneutrale Definitionen fest.

Proprietäre Daten werden vor Dritten geschützt, um zu verhindern, dass Daten verändert oder unkontrolliert genutzt werden. Eine Problematik ergibt sich bei der Verwendung von proprietären Dateien in Bezug auf die Anzahl genutzter Datenformate. Für n Applikationen ergeben sich n Schnittstellen. Bei offenen Schnittstellen ist es prinzipiell möglich, dass n verschiedene Applikationen auf eine gemeinsame Datenbasis zugreifen können [ERZ14], [Nü00]. Dies kann über eine Datei, eine Datenbank oder ein Datenbanksystem erzielt werden. Der Nachteil ist, dass jedes System einen Konverter zum Verstehen der Datenbasis benötigt. Eine andere Methode ist der Zugriff auf die Datenbanken aus anderen Anwendungen heraus über eine Datenbankschnittstellenspezifikation wie

z. B. Call Level Interface (CLI). Hier werden Funktionen/Methoden mittels Anweisungen bereitgestellt. Anwendungen können dann über Schnittstellen auf die Daten zugreifen. Der Vorteil ist, dass keine Pre- oder Postprozessoren erstellt werden müssen.

Sind neben den Geometrieinformationen noch ergänzende Daten vom CAX-System nötig, lassen sich diese zusätzlich über entsprechende Schnittstellen und selbstentwickelte Anwendungsapplikationen aus dem CAD-System auslesen und in einem weiteren Datenformat zum Informationsaustausch an das ausführende System übertragen [KiRo15]. Zu den bekanntesten Formaten gehören z. B. HTML (Hypertext Markup Language), XML (Extensible Markup Language) oder JSON (JavaScript Object Notation). Der Vorteil dieser sogenannten Auszeichnungssprachen ist eine strikte Unterscheidung zwischen Inhalt und Layout, wodurch die Inhalte mehrfach aus derselben Datenquelle verwendet werden können. Diese maschinenverständlichen Sprachen eignen zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten besonders gut. Die strukturierte Datenspeicherung kann als erweiterte Form der textbasierten Datenformate verstanden werden [Ro05].

2.5.1.1 STEP

STEP (STandard for the Exchange of Product model data) ist unter der Normreihe [ISO10303] eingetragen. Mit dem STEP-Format sollte ein Ersatz für die vielen Austauschformate geschaffen werden und somit nicht nur der Austausch von Geometriedaten ermöglicht werden, sondern eine Kompatibilität zwischen CAX-Systeme erreicht und ein vollständiger Austausch von allen während des gesamten Produktlebenszyklus anfallenden Daten gewährleistet werden. STEP wird weltweit und in vielen Bereichen der Industrie angewendet [Va09] und kann als Baukasten aus anwendungsspezifischen neutralen Dateiformaten verstanden werden. Die verschiedenen Produktmodelle werden unter Verwendung von Grundbausteinen zusammengesetzt [Dy02]. Darüber hinaus stellt STEP Definitionen zur Datenarchivierung zur Verfügung. Nach ANDERL soll das STEP-Format grundsätzlich:

- erweiterbar sein,
- Pre- und Postprozessoren effizient unterstützen,
- ein Minimum an Informationseinheiten (Entities) bieten (redundanzfrei),
- plattformübergreifend,
- von der lokalen Datenstruktur und dem physikalischen Speicherformat entkoppelt und
- fähig zur Bildung von anwendungsspezifischen Leistungsstufen sein.

Neben der Geometrie werden auch technologische Eigenschaften, wie Materialeigenschaften, Oberflächengüte und Toleranzen übertragen. Aufgrund der Komplexität von STEP wurden die zu bewältigenden Aufgaben in verschiedene Teilprojekte aufgeteilt, die sogenannten Anwendungsprotokolle (AP). Dabei handelt es sich um komplexe Datenmodelle, die aus den bereits beschriebenen Basismodellen aufgebaut sind. Aus den Basismodellen werden die benötigten Objekte ausgewählt und durch Spezialisierungen erweitert. Damit ist es möglich, branchen- und anwendungsgerechte Produktdatenmodelle zu definieren. Für den spezifischen Anwendungsaspekt der AP ist es erforderlich, dass der Geltungsbereich genau definiert ist. Beispiele für Anwendungsprotokolle sind:

- AP203 (Configuration Controlled Design),
- AP209 (Composite and metallic structural analysis and related design),
- AP214 (Core Data for Automotive Mechanical Design and Processes),

- AP 242 (erweiterter Zusammenschluss von AP 203 und AP 214, der zum globalen Standard in den Bereichen Aerospace und Automotive werden soll).

Das Anwendungsprotokoll AP203 definiert ein Informationsmodell für den Austausch von Teilen und Baugruppen sowie Konfigurationen auch mit zugehöriger 3D-Geometrie. Es gehört zu den ersten Anwendungsprotokollen und ist seit 1994 im Standard definiert. Mit AP203 werden folgende geometrische Elemente unterstützt: Randflächenmodelle, B-Rep, Drahtgittermodelle, Flächenmodelle sowie mannigfaltige Flächenmodelle. Das AP209 dient zum Austausch von Daten zwischen CAD- und CAx-Systemen, mit denen FEM-Simulationen durchgeführt werden können [AnTr00]. Das AP2014 deckt spezielle Anforderungen der Automobilindustrie an ein Produktmodell ab. Es beinhaltet ein Datenmodell für die mechanische Sicht auf den Produktlebenszyklus in der Fahrzeugentwicklung. Es deckt den Bereich der Produktdefinition, Styling, Konstruktion, Prototypenherstellung, Produktionsplanung bis hin zur Qualitätskontrolle ab. Dazu gehören geometrische und nicht geometrische Daten von Baugruppen, Bauteilen, Produkten und Betriebsmitteln [An93]. Das STEP-Format unterliegt einem ständigen Entwicklungsprozess, was beispielsweise die Aktivitäten um den AP 242 belegen [Pr16], [ST16], sodass auch in Zukunft relevante Verbesserungen zu erwarten sind. Auf der anderen Seite bringt es jedoch einige Probleme mit sich. Der Aufbau ist sehr umfangreich und komplex. Dies hat zur Folge, dass die Implementierung aufwendig und teuer ist. Des Weiteren sind die Daten in der Regel inkompatibel zueinander, sodass verschiedene Konverter für die Anwendungsprotokolle realisiert werden müssen. Diese müssen zudem verwaltet und gepflegt werden. Für verschiedene CAD-Systeme existieren bereits Konverter, die vom Anwender direkt verwendet werden können. Die Konverter unterscheiden sich allerdings oft so stark, dass es zu Informationsverlusten und Fehlern kommen kann.

Jedes Anwendungsprotokoll kann für sich als neutrales Datenformat betrachtet werden. Neben dem zusätzlichen Aufwand zur Implementierung ist zu beachten, dass Spezifikationen zwar grundsätzlich offen sind, jedoch kostenpflichtig bei der ISO erworben werden müssen. STEP verwendet keine Verfahren zur Datenkomprimierung. Dies wirkt sich nachteilig auf den Datenversand aus. Allgemein gilt, dass für den Datenaustausch mittels STEP, Sender und Empfänger eine zum STEP-Format kompatible Struktur unterstützen müssen. Einfach ausgedrückt kann STEP als eine Menge von Formaten verstanden werden, bei der für jede spezifische Ausführung Konverter erstellt werden müssen [Me91].

Auf Basis des STEP-Formates wurde das Format STEP-NC entwickelt. Es handelt sich hierbei um eine nach ISO 14649 [ISO14649-X] genormte Schnittstelle, die der Fertigung ein Modell zur vollständigen Beschreibung der Bearbeitungsaufgaben zur Verfügung stellt. STEP-NC ermöglicht es, die Geometriedaten direkt in einem NC-Programm zu nutzen. Dabei lässt sich das STEP-NC Format in einen administrativen Teil, in ein allgemeines und in ein technologieorientiertes Prozessmodell unterteilen und mit Fertigungswissen anreichern [He11].

2.5.1.2 JT

JT-Format (Jupiter Tessellation) dient dem Austausch und der Visualisierung von 3D-Daten und ist heutzutage in der Automobilindustrie stark verbreitet. Seit Dezember 2012 ist das Datenformat offiziell standardisiert [ISO14306]. Im Vergleich zu anderen neutralen Datenformaten verfügt JT-Format über eine hohe Kompressionsrate und damit einen geringeren Speicherbedarf. Das begünstigt vor allem einen schnellen Datenaustausch großer Baugruppen und ihre Visualisierung. Über das JT-Format können u. a. folgende Aspekte übertragen und visualisiert werden:

- Produkt-/CAD-Strukturen mit Attributen,

- facettierte Geometriebeschreibung (Dreieckflächengeometrie mit einstellbaren Levels of Details),
- exakte Geometriebeschreibung (B-Rep Beschreibung in Form von JT-BREP oder XT-BREP (basierend auf dem Parasolid Kernel)),
- Eigenschaften zur Visualisierung wie Material, Licht, Textur,
- Product Manufacturing Information (PMI),
- Metadaten.

Neben der Übertragung der Struktur- und Geometrieinformationen können auch Fertigungsinformationen wie Bemaßungen, Toleranzen oder Oberflächenbeschaffenheit abgebildet werden. Somit soll auch das JT-Format zur Übergabe der Daten an CAx- und CAM-Systeme geeignet sein [Se09].

Der Aufbau einer JT-Datei besteht aus verschiedenen Arten von Datensegmenten. Jedes dieser Segmente kann verschiedene Daten beinhalten, die mit dem JT-Format übertragen werden können. Je nach Verwendungszweck sind diese Segmente unterschiedlich aufgebaut, wobei jedes auch einzeln ausgelesen werden kann. Somit ist es auch möglich, die Segmente aufzuteilen und in zwei unterschiedlichen Dateien abzuspeichern. Die Segmente bestehen im Einzelnen aus einer Basis- und Produktstruktur, exakten oder approximierten Geometrien und zusätzlichen Daten, welche u. a. fertigungsrelevante Informationen beinhalten können. [Jä91].

In [FLL11] wurden verschiedene Datenaustauschformate verglichen. JT hat sich dabei als zuverlässig zum Austausch von 3D-Modellen gezeigt. Dabei wurde allerdings auch erkannt, dass JT-Konverter die Daten nicht immer einheitlich übertragen. Produktstrukturen und exakte Produkt-Geometrien werden weitgehend richtig übersetzt. Probleme bereitet häufig die Konvertierung von fertigungsrelevanten Informationen. Hier sind Unterschiede bei verschiedenen Konvertern zu erkennen. Ein großer Vorteil des JT-Formates ist die Aufrechterhaltungsmöglichkeit der Modellassoziativitäten zum Originalmodell über spezielle IDs.

2.5.1.3 IGES

IGES (Initial Graphics Exchange Specification) ist eines der ersten entwickelten CAD-Austauschformate. Unter dem Standard „ANSI Y 14.26M“ wird IGES auch heute noch genutzt. Die ursprüngliche Version 1.0 stellte ausschließlich 2D/3D-Geometriedaten des Kantenmodells zur Übertragung zur Verfügung. Mit der Version 2.0 wurden Erweiterungen um Elemente für die Bereiche Elektrotechnik und Finite-Elemente-Berechnungen sowie ein binäres Speicherformat angefügt. Ab Version 3.0 konnten bereits 3D-Flächeninformationen übertragen werden. In der Version 4.0 kamen zusätzlich noch Volumeninformationen nach dem CSG (Constructive Solid Geometry) hinzu. Die aktuelle Version 5.3 wurde 1996 veröffentlicht. Sie umfasst folgende Spezifikationen:

- 2D/3D-Kantenmodell, 2D/3D-Kurven und Oberflächen,
- CSG (seit Version 4.0 in 1988),
- B-Rep (seit Version 5.1 in 1991),
- Zeichnungselemente für technische Zeichnungen,
- Finite-Elemente-Netze.

Das IGES-Format basiert auf dem Konzept der Grundinformationseinheit einer Entity. Die Informationen werden in sogenannten Entities gespeichert. Diese Entities stellen dabei ein allgemeines

Datenelement mit einem bestimmten Elementtyp, wie beispielsweise geometrische Objekte, wie Punkte, Linien, Kreisbögen, Transformationsmatrix, Bemaßungselemente, oder Elemente für Gruppen sowie Attributzuordnung dar [Jä91]. Diese können in einer beliebigen Hierarchie angeordnet werden. Darüber hinaus ist es möglich, eigene Elementtypen zu definieren. Voraussetzung ist dabei, dass Startsystem und Zielsystem die Fähigkeit besitzen, die neu definierten Elementtypen zu interpretieren. Zusätzlich stellt IGES ein Makro-Element bereit, mit dem es möglich ist, über eine Programmiersprache Elemente zu parametrisieren [Jä91].

Zu den Vorteilen des IGES-Formates gehört, dass es von den meisten Anwendungen im CAx-Umfeld gelesen werden kann. Der Aufbau einer IGES-Datei ist einfach, kann allerdings durch die Speicherung im ASCII-Format schnell mehrere Megabyte betragen. Durch Komprimierungsmethoden kann die Dateigröße reduziert werden [Jä91].

Aufgrund von Fehlinterpretationen des Postprozessors beim Einlesen einer Datei kann es Probleme beim Dateihandling geben. Darüber hinaus kann mit IGES nicht der gesamte Produktlebenszyklus dargestellt werden. Der Austausch über IGES-Format erfolgt mittels Pre- und Postprozessoren, welche systemspezifisch erstellt werden, wodurch ein fehlerfreier Input und Export Probleme bereitet. Durch diese Problematik sowie die noch immer sehr große Versionsvielfalt ist eine aufwendige Nachbearbeitung nötig [Jä91], [Na06].

2.5.1.4 VDA-FS

Bei VDA-FS handelt es sich um eine Flächenschnittstelle des Verbandes der Deutschen Automobilindustrie (VDA), diese wurde von den Automobilherstellern und Automobilzulieferern speziell zur Übertragung von Freiformflächen und Freiformkurven beliebigen Grades erschaffen. Mit dieser Schnittstelle ist es nur möglich 2D/3D-Informationen auszutauschen. Es können keine weiteren Informationen abgelegt werden.

Die erste Version wurde im Jahr 1986 genormt [DIN66301]. Eine Ergänzung führte 1987 zur VDA-FS-Version 2, die über den Verband der Deutschen Automobilindustrie (VDA) sowie den Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer (VDMA) veröffentlicht wurde. Die Erweiterung beinhaltet neben Freiformkurven und Freiformflächen auch die Abbildung von Berandungen sowie von topologischen Zusammenhängen [An93].

Bei der Spezifikation von VDA-FS wurde auf eine eindeutige und kompakte Struktur geachtet. Die mathematische Beschreibung erfolgt durch parametrisierte Polynome beliebiger Ordnung für alle Kurven- oder Flächensegmente einer Oberfläche. Damit wird eine einfache mathematische Formulierung für gekrümmte Oberflächen verwendet. Dadurch ist VDA-FS einfach aufgebaut und einfach zu handhaben. Mit VDA-FS können zwar 2D- und 3D-Informationen übertragen werden, allerdings keine Zeichnungsinformationen. Eine Übertragung von Produktinformationen wie Farben oder Material ist auch nicht möglich. Ursprünglich wurde VDA-FS eingesetzt, um 3D-Daten zwischen den CAD-Systemen CATIA, Unigraphics, Pro/ENGINEER zu konvertieren. Heute unterstützt nahezu jedes CAD-System VDA-FS [BBK08].

2.5.1.5 XML

Bei XML (Extensible Markup Language) handelt es sich um eine erweiterbare Auszeichnungssprache zur Beschreibung strukturierter Daten, mit dem Ziel die Inhalte maschinell lesbar, auffindbar und manipulierbar zu machen. Dabei werden der Inhalt, die Form, die Struktur und die Gestaltung voneinander getrennt behandelt. XML besteht zunächst aus Anweisungen, die Auskunft über die

inhaltliche Struktur liefern. Die Struktur ist dabei variabel und kann für unterschiedliche Anwendungsfälle für verschiedene Arten von Dokumenten angepasst werden. Des Weiteren ist XML plattformunabhängig und die erstellten Dokumente können sowohl unter Windows-Rechnern als auch in einem Linux/Unix-System verwendet werden [Er08]. Von der Struktur erinnert XML stark an HTML, da XML-Dokumente wie HTML aus Tags und darin eingebetteten Informationen bestehen. Durch eine entsprechende Benennung der Tags ist es möglich, bereits im Tag die passenden Informationen über die Bedeutung des Inhaltes auszuzeichnen. Durch Verschachtelung der Tags wird dem Dokument eine Struktur gegeben. Eine beispielhafte Verschachtelung ist in der Abb. 2-32 dargestellt.

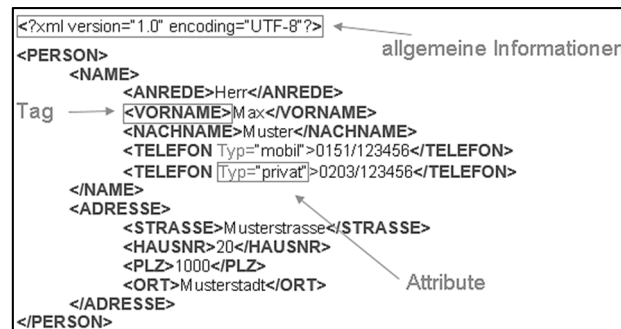


Abb. 2-32: Verschachtelung in XML-Datei

Zu den Nachteilen von XML gehört die fehlende Möglichkeit der Komprimierung, da die Daten im Textformat gesendet werden. Zum Auslesen der Daten aus einer XML-Datei ist so gut wie in allen Fällen ein XML-Parser erforderlich.

Aufgrund freier Verfügbarkeit ist XML nicht nur im Datenaustausch zwischen Systemen unterschiedlicher Hersteller, sondern auch für den datenbasierenden Informationsaustausch im Internet sowie bei Datenbanken geeignet und ermöglicht somit einen breiten Anwendungsfall [KI01]. Über XML ist die Übertragbarkeit beliebiger Informationen möglich und somit prinzipiell auch von fertigungsrelevanten Daten. Zu beachten ist hierbei, dass geeignete Konverter sowohl zum Erstellen als auch zum Laden zur Verfügung stehen müssen [GNK05], [Vo13]. Für einen Informationsaustausch zwischen datenerzeugenden und datenverwaltenden Produkten innerhalb des Siemens-PLM-Software-Paketes sowie zur Integration von Fremdanwendungen wird die PLM-XML-Datei, ein auf XML basierendes Austauschformat zur Übertragung von Produktdaten verwendet [Si16].

2.5.1.6 JSON

Die JavaScript Object Notation (JSON) ist ein kompaktes Datenformat zum Datenaustausch zwischen Anwendungen, welches häufig als Alternative zu XML verwendet wird. JSON ist für Menschen leicht lesbar und aufgrund seines einfachen Aufbaus auch leicht erstellbar. Es basiert auf einer Untermenge der JavaScript-Programmiersprache (Standard ECMA-262 dritte Edition) [JS15]. Für das Datenformat stehen in vielen Programmiersprachen, wie z. B. Java, C oder C++, entsprechende Bibliotheken zur Verfügung, wobei eine JSON-Datei unabhängig von der Programmiersprache strukturiert werden kann. Damit kann JSON auch verwendet werden, um Daten zwischen Programmen auszutauschen, die in verschiedenen Programmiersprachen implementiert wurden. Zwar lässt sich der Aufbau einer JSON-Datei beliebig gestalten, allerdings ergeben sich dadurch bei jeder Änderung zeitaufwendige Anpassungen an den Konvertern.

Ein JSON-Objekt ist hierarchisch aufgebaut, das heißt, eine JSON-Datei beginnt immer zuerst mit einer geschweiften Klammer. Innerhalb dieser geschweiften Klammer können dann verschiedene

Datentypen benutzt werden. Die gesamten Daten innerhalb der geschweiften Klammern werden als Container bezeichnet. Diese Daten können wie bereits erwähnt Daten, aber auch wiederum Arrays oder weitere Container sein. Die Verschachtelungstiefe kann beliebig tief sein. Eine JSON-Datei wird aus Objekten, Arrays, Zahlen, Zeichenketten, Booleschen Werten und dem Nullwert (wie Abb. 2-33 dargestellt) aufgebaut.

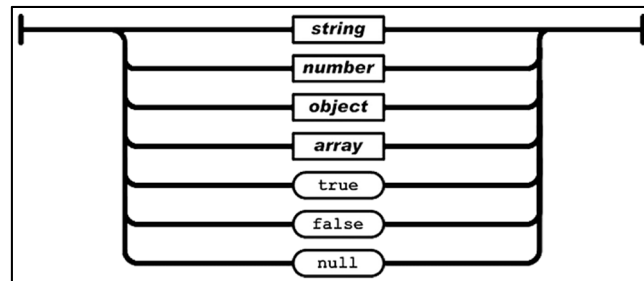


Abb. 2-33: Werte in einer JSON-Datei [JS15]

Der große Vorteil ist die einfache Implementierung und Handhabung, da sie auf wenigen, simplen Datentypen basiert. Durch die Kurzschreibweisen für Objekte und Arrays sowie durch die Vernachlässigung der Tags ist das Datenvolumen geringer als bei XML. Die Auf- und Abwärtskompatibilität ist gewährleistet, da die übertragenden Informationen erweitert und angepasst werden können. Die Verfügbarkeit ist für zahlreiche Entwicklungsumgebungen, Mechanismen zur Verarbeitung von JSON gegeben und über sogenannte JSON-Schemas können die Dateien validiert werden.

Im Vergleich zu XML ist JSON allerdings etwas beschränkter. Es bietet beispielsweise keine Möglichkeit Namensräume zu definieren. Des Weiteren ist XML eine vollwertige Markup-Sprache und bietet dadurch deutlich mehr Möglichkeiten.

Aufgrund seiner Kompaktheit und der hohen Verbreitung eignet sich JSON insbesondere zur Kopplung an Webservices oder Webapplikationen. Besonders geeignet ist es bei ressourcenarmen CPUs oder bei geringem Arbeitsspeicher.

2.5.2 Datenbanksystem

Ein Datenbanksystem (DBS) besteht aus einer Verwaltungssoftware – dem Datenbankmanagementsystem (DBMS) und einer Menge der zu verwaltenden Daten – der Datenbank (DB) [Lu09].

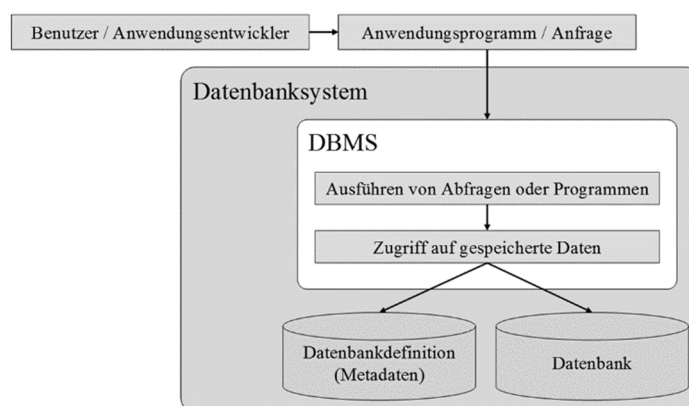


Abb. 2-34: Aufbau eines Datenbanksystems [Lu09]

Die wesentliche Aufgabe eines DBS ist die effiziente, widerspruchsfreie und dauerhafte Speicherung großer Datenmengen sowie eine bedarfsgerechte Bereitstellung der Daten und ihrer Teilmengen für

den Anwender und das Anwenderprogramm. Dabei wird eine strukturierte Speicherung der Daten sowie der Zugriff auf die Daten durch das DBMS organisiert und kontrolliert. Die Grundlage für die Strukturierung der Daten und ihrer Beziehungen zueinander stellt das Datenbankmodell dar. Es wird u. a. zwischen folgenden Datenmodellen unterschieden [KeEi15]:

- hierarchisches Datenbankmodell (die Datenobjekte stehen ausschließlich in einer Eltern-Kind-Beziehung zueinander),
- Netzwerkdatenbankmodell (die Datenobjekte werden miteinander in Netzen verbunden),
- relationales Datenbankmodell (die Daten werden zeilenweise in Tabellen verwaltet. Es können beliebige Beziehungen zwischen den Daten bestehen),
- objektorientiertes Datenbankmodell (die Beziehungen zwischen Datenobjekten werden vom Datenbanksystem selbst verwaltet, wobei die Objekte die Eigenschaften und Daten von anderen Objekten erben können).

Es existiert eine Vielzahl von Misch- und Nebenformen, wie zum Beispiel das objektrelationale Modell, jedoch die gebräuchlichste Form stellt das relationale Datenbankmodell dar, welches ein etablierter Standard für Datenbanken ist.

2.5.2.1 Relationale Datenbank

Die Grundlage des Konzeptes relationaler Datenbanken ist die nach Codd [Co91] vorgeschlagene relationale Algebra. Sie stellt eine mathematische Beschreibung dar, mit der sich Operationen auf einer Menge von Relationen⁹ anwenden lassen und somit die Relationen verknüpfen, filtern oder umbenennen. Die Ergebnisse aller Operationen sind ebenfalls Relationen, welche in DBS in Form von Tabellen dargestellt werden.

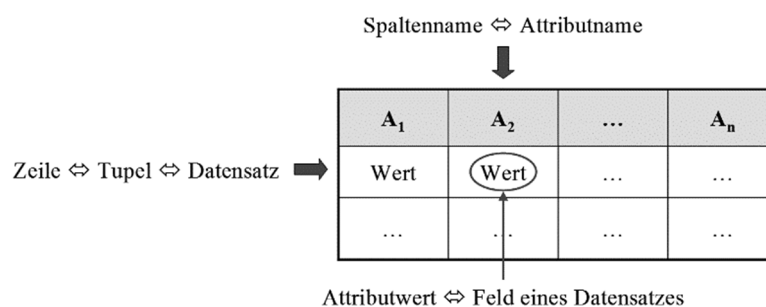


Abb. 2-35: Relation in Tabellendarstellung [Lu09]

Jede Zeile (Tupel), welche aus einer Reihe von Attributwerten (Attribute = Eigenschaften) besteht, stellt in einer Tabelle einen Datensatz dar. Das Relationsschema legt dabei die Anzahl und den Typ der Attribute für eine Relation fest und beschreibt somit den Aufbau der Tabelle.

Die Identifikation eines Datensatzes erfolgt mittels sog. Schlüssel. Dabei stellt der Primärschlüssel die Attribute oder minimale Mengen von Attributen dar, die einen Datensatz eindeutig identifizieren. Über den Primärschlüssel ist eine Verknüpfung von Relationen möglich. Dazu wird der Primärschlüssel der einen Relation als Attribut in die andere Relation aufgenommen. In diesem Fall wird von einem Fremdschlüssel gesprochen.

⁹ Relation (lat. relatio „Beziehung“, „Verhältnis“) bedeutet i. A. eine Beziehung, die zwischen Dingen bestehen kann. Relationen im Sinne der Mathematik sind ausschließlich diejenigen Beziehungen, bei denen stets klar ist, ob sie bestehen oder nicht.

Für weiterführende Informationen zu Datenbanksystemen und Eigenschaften der einzelnen Datenbankmodelle sei auf die weiterführende Literatur verwiesen ([Ge11], [Ge14], [KeEi15], [KlRa05], [Pi11], [UnMa12], [VoHa15], [BrAp91], [Kl01], [Ad12]).

2.5.2.2 Datenbanksprache SQL

Zum Abfragen und Manipulieren der Daten wird überwiegend die standardisierte Datenbanksprache SQL (Structured Query Language) eingesetzt, deren theoretische Grundlagen auf relationale Algebra zurückzuführen sind. Die letzte Fassung des Standards stammt aus dem Jahr 2011 und wird daher SQL:2011 genannt. SQL:2011 ist sehr umfangreich und in mehrere Teile gegliedert, die jeweils in einem eigenen Standardisierungsdokument beschrieben werden [ISO9075:2011]. Hervorzuheben ist die [ISO9075-14:2011], in der genau festgelegt ist, wie SQL in Zusammenhang mit XML verwendet werden kann.

Im Gegensatz zu prozeduralen Programmiersprachen ist SQL eine mengenorientierte und deklarative Sprache, deren Sprachbefehle sich in drei Kategorien einteilen lassen:

- Data Definition Language (DDL): Befehle zur Definition des Datenbankschemas,
- Data Manipulation Language (DML): Befehle zum Erzeugen, Manipulieren und Ändern von Datensätzen. Schließt Befehle zur Erzeugung von Abfragen mit ein,
- Data Control Language (DCL): dient der Rechteverwaltung innerhalb der Datenbank.

Der Aufbau der Abfrage-Klauseln (SQL-Statements) wird durch das Datenbankschema bestimmt. Mit steigender Komplexität der Zusammenhänge zwischen den Relationen steigt auch der Grad der Verschachtelung in den SQL-Statements an. Ohne genaue Kenntnis des Datenbankschemas ist somit die Formulierung der SQL-Statements nicht durchführbar. Eine Abhilfe schafft die Möglichkeit der Definition von sog. Sichten (Views), welche eigentlich vordefinierte SQL-Statements darstellen. Alle weiteren SQL-Statements können auf diese vereinfachte Sicht ausgeführt werden.

2.5.2.3 Datenbanksystem MySQL

MySQL ist das weltweit populärste Open-Source-Datenbanksystem, welches eine kosteneffiziente Bereitstellung zuverlässiger, hochleistungsfähiger und skalierbarer webbasierter und eingebetteter Datenbankanwendungen ermöglicht [Or16]. Sein bevorzugtes Einsatzgebiet ist die Datenspeicherung für Webservices [Ad12], [UnMa12]. Dabei werden die Daten in den Datenbanken auf einem Server oder Serververbund den Clients (Anwendungen) zur Verfügung gestellt. Der MySQL-Server besteht – wie jedes DBMS – aus vielen Komponenten, die in der Abb. 2-36 auszugsweise dargestellt sind.

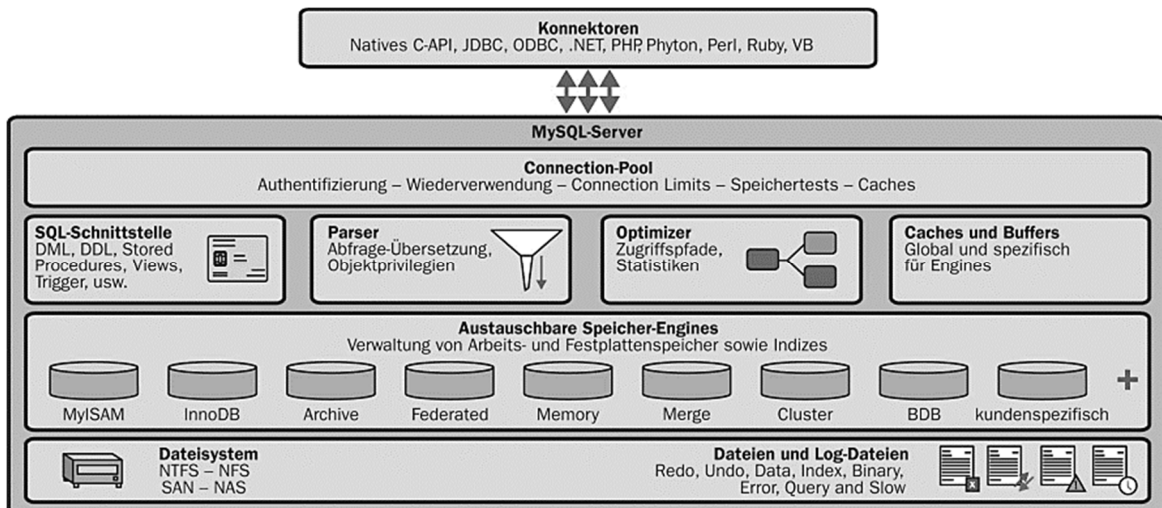


Abb. 2-36: Komponenten von MySQL [My16]

Die Verbindung (Sitzung) zum MySQL-Server, welche über das TCP/IP-Protokoll erfolgt, wird über die sog. Konnektoren realisiert. Alle Verbindungen zwischen dem Client und Server werden durch den Connection-Pool verwaltet. Die Befehle werden über die SQL-Schnittstelle entgegengenommen und an einen Parser weitergeleitet, welcher u. a. die Syntax eines Befehls überprüft. Nicht triviale Befehle können durch einen Optimierer behandelt werden, welcher z. B. im Zwischenspeicher (Cache) vorhandene Ergebnisse berücksichtigt. Die im Zwischenspeicher aufgehobenen Ergebnisse und/oder Daten können in der aktuellen Sitzung oder allen Sitzungen verfügbar gemacht werden. Die tatsächliche Datenverarbeitung findet in den sog. Storage Engines statt. Der große Vorteil von MySQL ist, dass jeder mit einem besonderen Bedarf eine Engine aufbauen kann, wobei auf die Schnittstelleneigenschaften und Restriktionen besonders Rücksicht genommen werden sollte [WiAx02].

Mit der Version 5.7 von MySQL wird eine umfassende JSON-Unterstützung angeboten, welche sowohl die Speicherung und Suche als auch die Verarbeitung schemaloser Daten flexibel macht. Dafür sorgen u. a. neue native JSON-Daten-Typen und JSON-Funktionen [Or16], [My16].

Tiefgehende Informationen sind aus der Literatur wie z. B.: [Ad12], [DaSe14], [Du14], [My16], [Or16], [PZG15], [Sm12], [WiAx02] zu entnehmen.

2.5.3 Informationstechnologien

2.5.3.1 Service-orientierte Architektur (SOA)

Nach OASIS [OA06] steht Service Oriented Architecture (SOA) für „ein Paradigma für die Strukturierung und Nutzung verteilter Funktionalität, die von unterschiedlichen Besitzern verantwortet wird“. MELZER [Me10] versteht unter SOA eine Systemarchitektur, die vielfältige und eventuell inkompatible Methoden oder Applikationen als wiederverwendbare und offen zugreifbare Dienste repräsentiert und dadurch eine plattform- und sprachenunabhängige Nutzung und Wiederverwendung ermöglicht. Das in der Abb. 2-37 dargestellte Grundkonzept einer SOA besteht aus einem Fundament, welches offene Standards, Sicherheit und Einfachheit bilden, und den tragenden Säulen, welche die verteilten Dienste, die lose Kopplung, die Plattformunabhängigkeit und die prozessorientierte Struktur darstellen (siehe auch [Me10]).

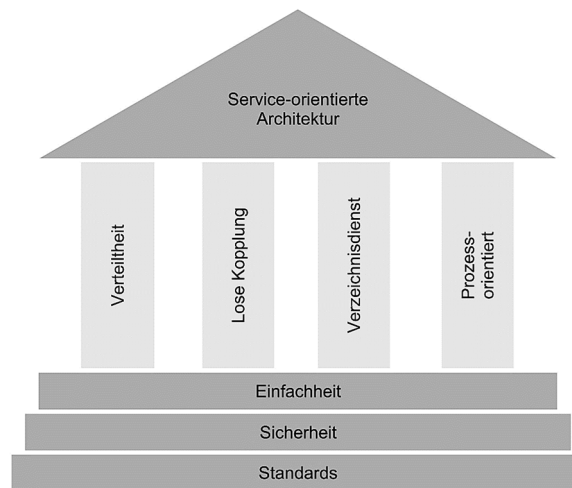


Abb. 2-37: SOA Tempel [Me10]

Bei SOA handelt es sich letztlich um eine grundsätzliche Denkweise für eine serviceorientierte Architektur, um verfügbare Datenbanken, Server und Webseiten in Dienste zu kapseln und anderen Organisationsabteilungen und Benutzern anzubieten. Dahinter verbirgt sich ein Konzept für eine an den Geschäftsprozess eines Unternehmens ausgerichtete IT-Infrastruktur, welche verschiedene Systeme leichter miteinander integrieren kann, als dies Direktschnittstellen vermögen [Se11]. Eine solche Integration begünstigt vor allem die Automatisierung und Optimierung der Prozessabläufe, welche durch die Interaktion zwischen mehreren Softwaresystemen innerhalb des Unternehmens, aber auch unternehmensübergreifend geprägt sind [KoLe04]. Für solche Anwendungsintegrationen, welche im Rahmen der Enterprise Application Integration (EAI) vorgenommen werden, ist SOA von großer Bedeutung und erfordert eine starke Einbeziehung der einzelnen IT-Komponenten.

Im Mittelpunkt einer SOA stehen vor allem die Dienste (Services), welche in einem Netzwerk, Cloud, oder Internet verfügbar gemacht und genutzt werden können. Zu den Eigenschaften eines Dienstes gehört die Plattformunabhängigkeit, was bedeutet, dass Anbieter und Nutzer eines Dienstes in unterschiedlichen Programmiersprachen auf verschiedenen Plattformen realisiert sein können. Die Nutzung eines Dienstes erfordert lediglich die Kenntnisse ihrer Schnittstelle und nicht ihrer Implementierungsdetails. Der grundlegende Ablauf ist in der Abb. 2-38 dargestellt.

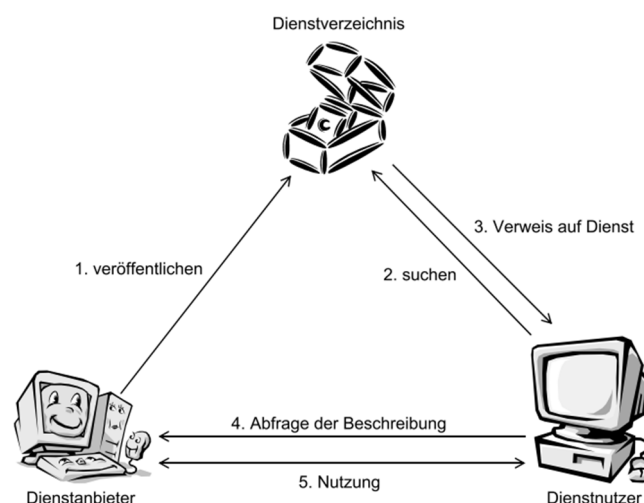


Abb. 2-38: SOA Dreieck [Me10]

Zusammenfassend lassen sich auf Basis der verschiedenen Literaturquellen zum Thema SOA ([Vo11], [StTi07], [SWD09], [Pa09], [OA06], [NPS08], [MeTi09], [Me10], [Kr08], [KBS07], [Ha10], [Bu07], [Fr07], [ArKe11]) folgende Feststellungen formulieren:

- SOA ist nicht neu. Eine serviceorientierte Architektur konnte auch schon Jahre vor der Einführung des Begriffes mit den damals vorhandenen Methoden und Verfahren umgesetzt werden und fand u. a. mit Common Object Request Broker Architecture (CORBA) ihre Anwendung.
- SOA ist weder eine Empfehlung noch die Lösung zur Behandlung von fachlichen Problemen.
- Eine „Standard SOA“ existiert nicht und muss unternehmensspezifisch auf die eigenen Bedürfnisse entworfen werden.
- SOA ist nicht gleichzeitig Webservice. Sie beschreibt ein Architekturparadigma, welches losgelöst von konkreten Implementierungsmethoden und -techniken angewandt werden kann. Webservice ist eine mögliche technische Instanz der SOA.

2.5.3.2 Webservice

Ein Webservice stellt einen Dienst (Service) über das Internet (Web) unter Nutzung eines Nachrichtenformates (XML oder JSON) zur Verfügung und ermöglicht einen plattformunabhängigen Zugriff auf Informationen von (eingebetteten) Systemen und die Kommunikation zwischen mehreren Anwendungen. Im Laufe der Jahre haben sich grundsätzlich zwei Ansätze etabliert, um auf die implementierten Methoden (Webservice) zuzugreifen:

- SOAP (Simple Object Access Protocol) XML-basiert
- RESTful Webservices (Representational State Transfer als Architekturmodell) nutzt HTTP-Anfragen (und damit URLs)

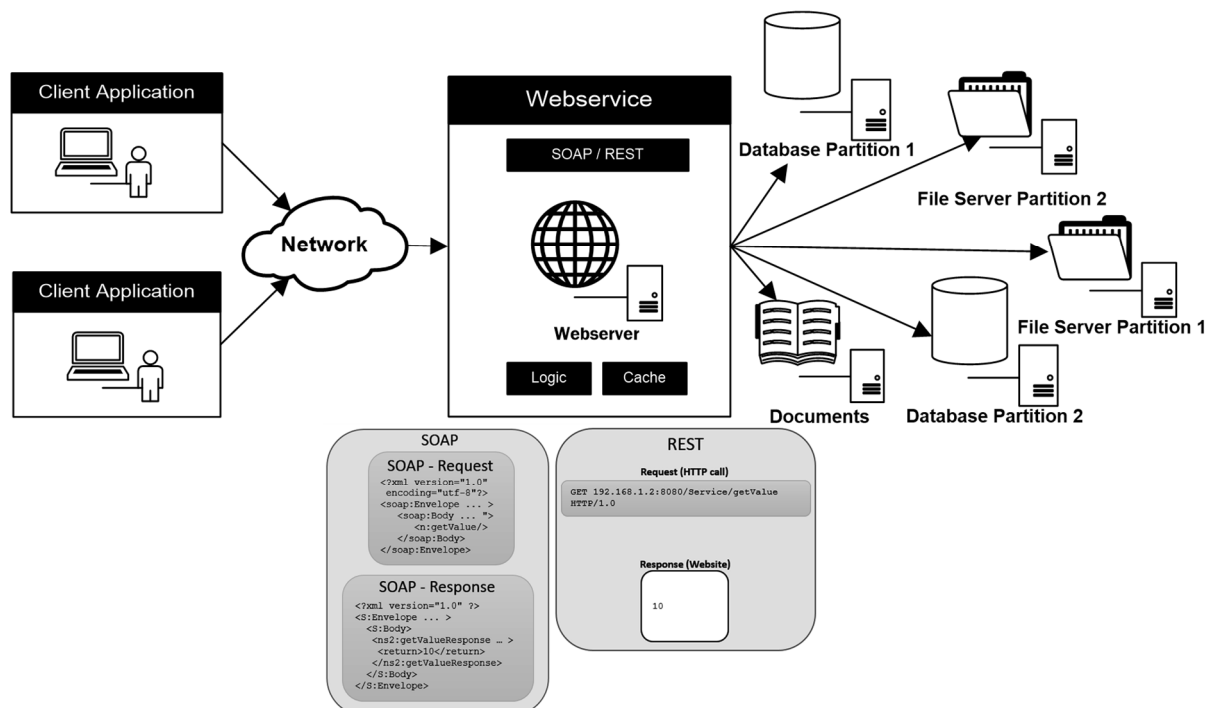


Abb. 2-39: Webservice

Die Schlüsseigenschaften eines Webservices sind nach KOSSMAN & LEYMAN [KoLe04]:

- Ein Webservice wird durch einen Uniform Resource Identifier (URI) identifiziert.
- Die Schnittstelle eines Webservices ist maschinenlesbar und wird durch Web Services Description Language (WSDL) beschrieben.
- Ein Webservice kommuniziert mit anderen Softwarekomponenten durch XML- oder JSON-Nachrichten.
- Der Nachrichtenaustausch kann insbesondere mithilfe von Internetprotokollen (z. B. HTTP oder SMTP) stattfinden.
- Webservices sind autonom. Es bedeutet, dass die Verarbeitung einer Nachricht durch einen Webservice nicht beeinflusst werden kann.

Zu den Vorteilen nach [Bu07], [Jä08], [KoLe04], [RiAm15], [TuOu14] des Webservices zählen vor allem:

- Interoperabilität,
- Plattformunabhängigkeit,
- Skalierbarkeit/Erweiterbarkeit,
- Wiederverwendbarkeit,
- Wartungsfreundlichkeit,
- die Tatsache, dass die Logik an einer Stelle abgelegt wird und auch dort verwaltet werden muss
- und ermöglicht einen gemeinsamen Zugriff auf alle organisationsinternen und -übergreifenden, global verteilten Informationen.

Webservices gelten als die Technologie, mit der Softwarekomponenten innerhalb einer Organisation und zwischen mehreren Organisationen integriert werden können.

3 Betrachtung ausgewählter Aspekte des CAD-CAM-Prozesses

3.1 Vorbemerkung und Bauteilspektrum

Wie bereits in Kapitel 1 angedeutet, ist die Einbeziehung der Produktionsmittel und -methoden und damit der Fertigungsstrategie in einer möglichst frühen Phase des virtuellen Produktentwicklungsprozesses ein sinnvolles strategisches Mittel, um die Steigerung der Produktivität innerhalb der Prozesskette Konstruktion-Fertigung zu beeinflussen. Die Grundbasis für die Bereitstellung, Integration und Etablierung des Fertigungswissens in der frühen Phasen der Produktentwicklung bilden vor allem die Begriffe der Wissenstransformation, Wissensformalisierung und letztlich des Wissenstransfers (vgl. auch Abschnitt 2.3.3). Dabei geht es um das Erfassen, Abstimmen und Auswerten der Daten, Informationen und des Wissens zwischen Konstruktion und Fertigung für die darauffolgende Formalisierung und Ableitung der programmierbaren Regeln (siehe Abb. 3-1).

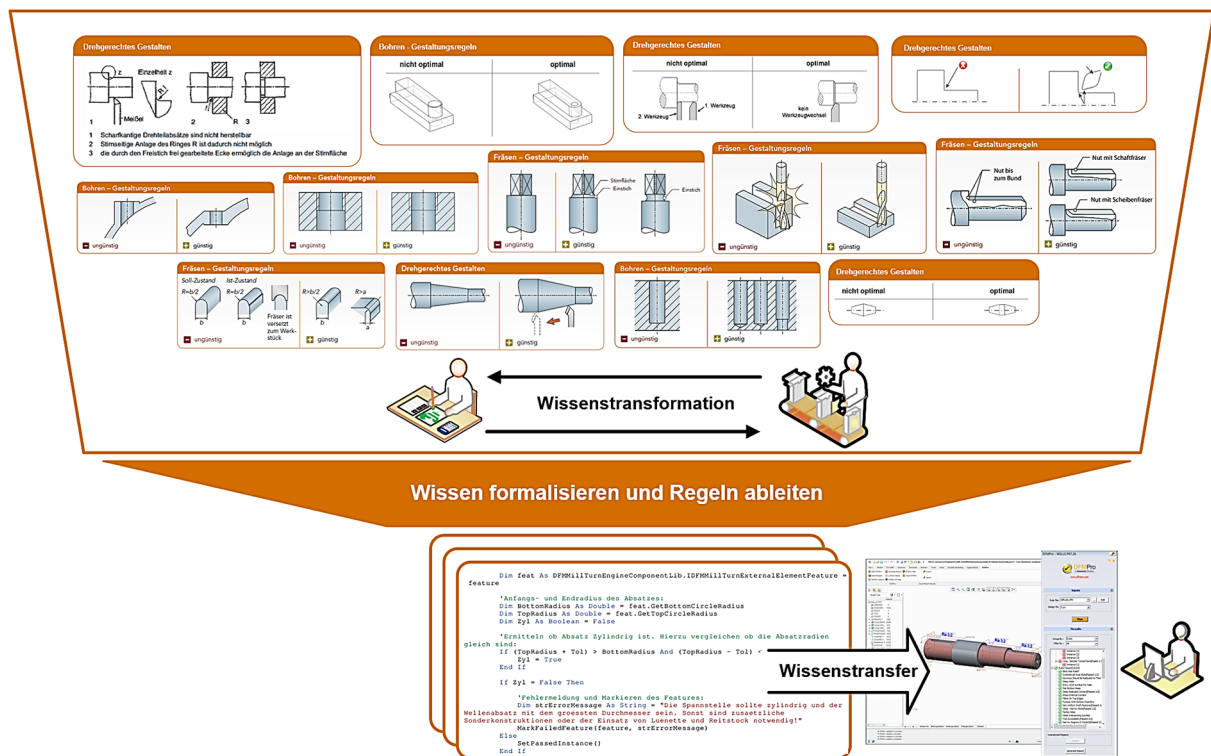


Abb. 3-1: Wissenstransformation, -formalisierung und -transfer

Die Prozesse der Transformation, Formalisierung und des Transferierens des Wissens zwischen der Fertigung und Konstruktion können durch einen gezielten Einsatz der KBE-Methoden realisiert werden. Dazu gehören, wie in der Abb. 3-2 dargestellt, u. a. spezielle Konstruktionsmethoden und Modellierungsstrategien, Feature-Technologien oder CAD-nahe Programmierungsmöglichkeiten.

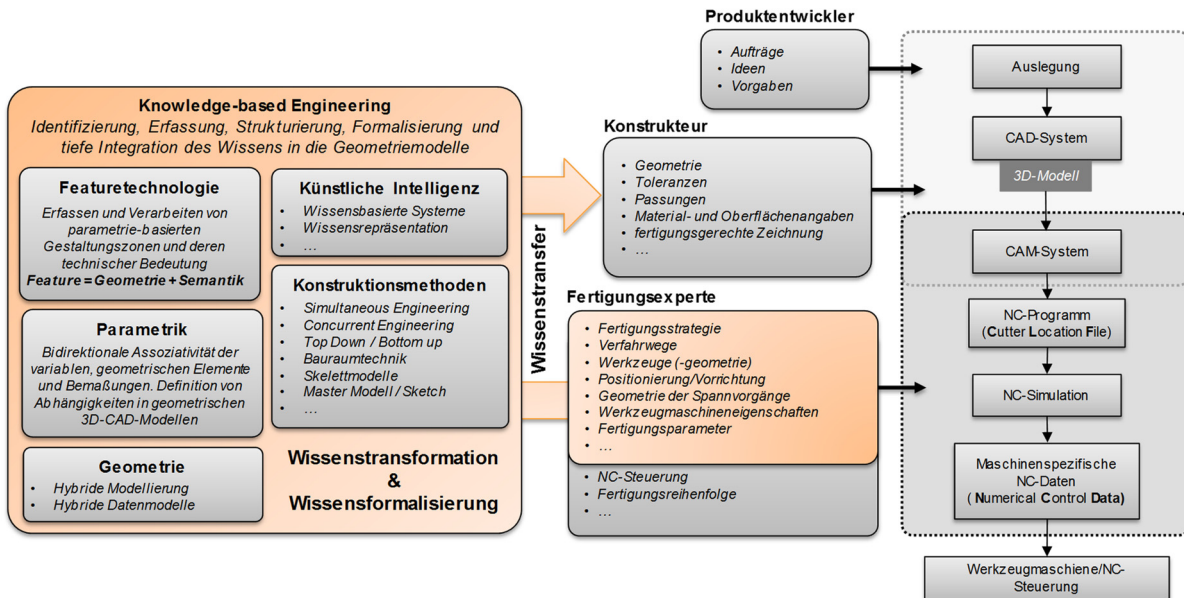


Abb. 3-2: KBE und Wissenstransformation, Wissensformalisierung und Wissenstransfer

Diesbezüglich wird in den folgenden Abschnitten der heutige Konstruktions- und Fertigungsprozess für rotationssymmetrische Bauteile beispielhaft betrachtet. Dabei zielt die Analyse des CAD-CAM-Prozesses nicht nur auf die strategisch-organisatorischen Aspekte, sondern auch auf die methodischen und modellierungstechnischen Vorgehensweisen. Der Schwerpunkt wird auf die normgerechte und fertigungsorientierte 3D-Produktgestaltung und anschließende Fertigungsverfahren gelegt. Von besonderem Interesse ist hier die Analyse der angewandten CAD-Modellierungstechniken und -methoden für die zerspanungsorientierte Geometriegestaltung der 3D-CAD-Modelle. Die Verfügbarkeit der Daten, Informationen und des Wissens in der Prozesskette Konstruktion-Fertigung wird ebenfalls einer kritischen Betrachtung unterzogen.

Im Rahmen der Analyse werden in dieser Arbeit verschiedene rotationssymmetrische Bauteile behandelt. Trotz der auf den ersten Blick scheinbar sowohl konstruktiven als auch fertigungstechnischen Einfachheit verbergen sich dahinter durchaus geometrisch und fertigungstechnisch komplexe Bauteile. Zu dem Bauteilspektrum gehören z. B. Wellen aus dem Bereich der klassischen Maschinenelemente, Zylinderschnecken oder Wendelverteilerwerkzeuge aus dem Bereich der Kunststoffverarbeitung.

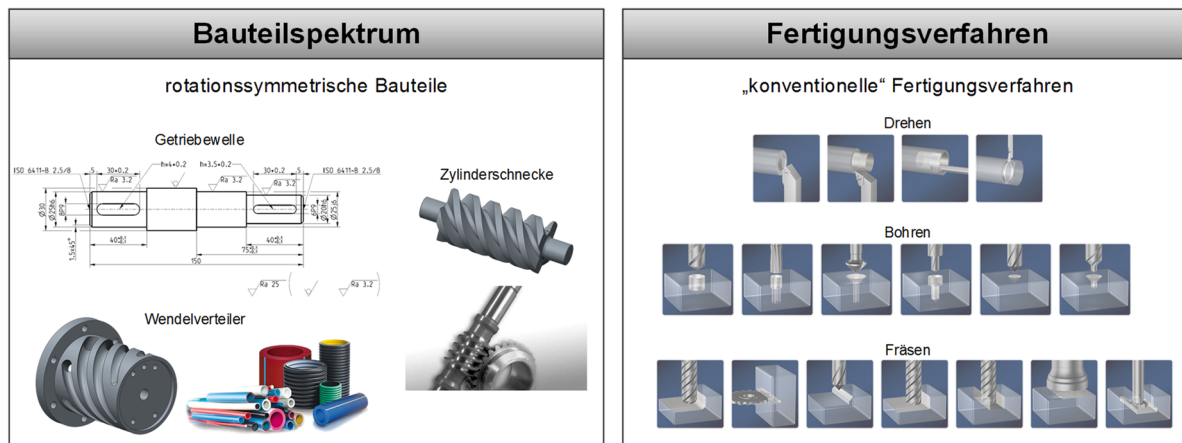


Abb. 3-3: Bauteilspektrum mit konventionellen Fertigungsverfahren zu ihrer Herstellung

Im Folgenden wird kurz auf die Bauteile eingegangen.

Wellen

Im Allgemeinen gehören Wellen zu den Maschinenelementen, welche zur Übertragung von Rotationsbewegungen und Drehmomenten sowie zur Lagerung rotierender Bauteile, wie z. B. Zahnrädern, Riemenscheiben oder Kupplungen eingesetzt werden. Die Form einer Welle wird durch ihre Verwendung (z. B. Kurbelwelle oder Getriebewelle), die Anordnung, Anzahl und Art der Lager sowie der aufzunehmenden Räder, Kupplungen, Dichtungen u. Ä. bestimmt [WMJ15]. Die Gestaltung von Wellen und Wellenenden erfordert eine Berücksichtigung entsprechender Gestaltungsgrundsätze und -richtlinien hinsichtlich der Festigkeit oder des elastischen Verhaltens (z. B. [WMJ15], [NBL07], [Sc67]). Gleichzeitig aber ist auch die Einbeziehung der genormten Wellenelemente wie z. B. DIN 509 für Freistriche [DIN509], Wellennuten für Passfedern [DIN6885] und Sicherungsringe [DIN471] oder Zentrierbohrungen [DIN332-8], [DIN332-7], [DIN332-2], [DIN332-1] und DIN 333 [DIN333] notwendig.

Zylinderschnecken

Die Zylinderschnecke ist Teil eines Schneckengetriebes, welches neben der Zylinderschnecke das sogenannte Schneckenrad beinhaltet. Die Berührung von Zylinderschnecke und Schneckenrad findet, im Gegensatz zur Punktberührung bei schrägverzahnten Getrieben, in einer Linie statt. Dies hat den Vorteil, dass das Schneckengetriebe geringere Abnutzungserscheinungen zeigt. Nach DIN 3975 [DIN3975-1] sind für Zylinderschnecken verschiedene Flankenformen aufgeführt, welche im Wesentlichen auf den verschiedenen Herstellungsverfahren und den dabei verwendeten Werkzeugen beruhen. Es wird zwischen ZA-, ZN-, ZI- und ZK-Schnecken unterschieden.

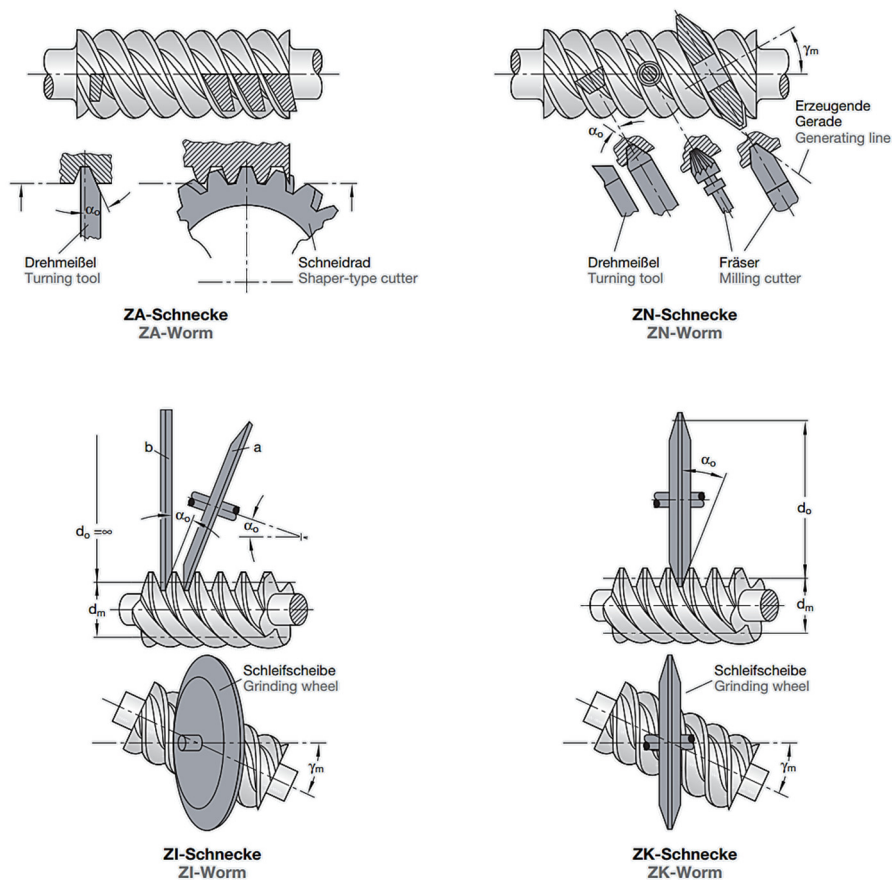


Abb. 3-4: Flankenformen von Zylinderschnecken [LM15]

- ZA-Schnecke weist ein geradliniges Flankenprofil im Axialschnitt auf. Die Flankenform wird hergestellt, indem ein trapezförmiger Drehmeißel im Achsschnitt angestellt wird. Im Achsschnitt, ein Schnitt, bei dem die Schnittebene die Rotationsachse des Werkstücks beinhaltet, zeigt sich dementsprechend das geradlinige Trapezprofil des Drehmeißels.
- ZN-Schnecke besitzt ein geradliniges Flankenprofil im Normalschnitt. Im Axialschnitt ist das Flankenprofil leicht konkav. Auch hier wird ein trapezförmiger Drehmeißel, in diesem Fall um den Mittensteigungswinkel γ_m geschwenkt, angestellt. Der Mittensteigungswinkel stellt dabei jenen Winkel dar, welcher von einer Tangente an den Mittenkreis und einer Stirnschnittebene eingeschlossen wird. Er steht in direkter Relation zu dem Gangwinkel bzw. der Steigung der Schraubenlinie und definiert damit die Lage der Normalschnittebene, welche senkrecht zu den Flankenlinien steht. In der Fertigung wird an Stelle des Drehmeißels auch auf Fingerfräser oder kleine Scheibenfräser zurückgegriffen.
- ZI-Schnecke besitzt Evolventenflanken im Stirnschnitt. Diese Flankenform entsteht z. B., wenn ein ebener Fräs- oder Schleifkörper, dessen Achse zur Schneckenachse um den Mittensteigungswinkel geschwenkt und zur Normalen auf die Schneckenachse um den Erzeugungswinkel α_0 geneigt ist, das Schneckenprofil erzeugt.
- Die Flanke einer ZK-Schnecke weist eine Krümmung im Axialschnitt auf, die vom Werkzeugdurchmesser und der Breite des Werkzeugprofils abhängig ist. Für die Fertigung der Flankenform K werden Schleifscheiben oder Scheibenfräser verwendet, welche um den Mittensteigungswinkel γ_m geschwenkt angestellt werden, wobei die Symmetrielinie des Scheibenprofils durch den Kreuzungspunkt der Achsen läuft.

Wendelverteiler

Beim Wendelverteiler handelt es sich um ein Extrusionswerkzeug aus dem Bereich der Kunststoffverarbeitung. Die Extrusion ist ein kontinuierliches Herstellverfahren zur Produktion von Profilen, Rohren, Schläuchen, Folien sowie Platten aus thermoplastischen Kunststoffen.

Die Aufgabe eines Wendelverteilers ist die Formgebung einer kontinuierlich mittels Extruder erzeugten thermoplastischen Kunststoffschmelze in die Produktform, ohne dass dabei die für die spätere Produktqualität (z. B. Wanddickenverteilung, Oberflächenbeschaffenheit oder die mechanischen Eigenschaften) stoffliche und thermische Homogenität verloren geht.

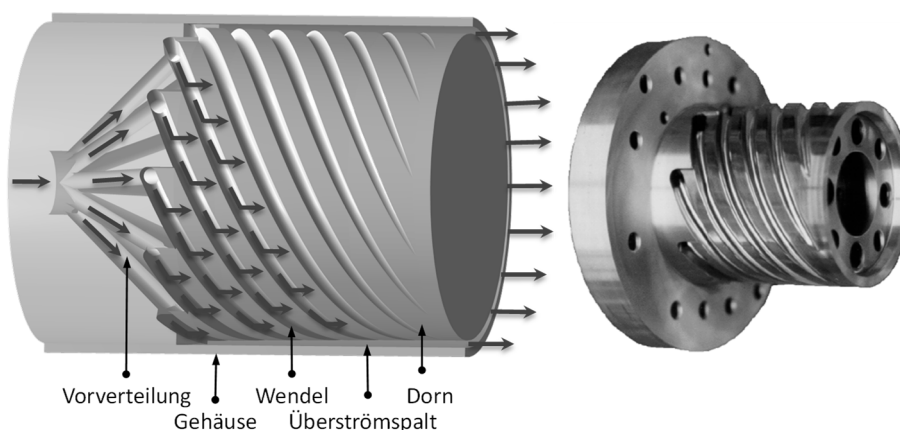


Abb. 3-5: Wendelverteilerwerkzeug nach [Wo14]

Ein Wendelverteilerwerkzeug lässt sich grundsätzlich in die drei Bereiche Vorverteilung (auch Primärverteilung), Sekundärverteilung und Düsenbereich unterteilen (vgl. Abb. 3-5). Die Vorverteilung wird vom Extruder gespeist und teilt die Schmelze in mehrere Ströme, die daraufhin den in der Sekundärverteilung befindlichen, wendelförmigen Fließkanälen zugeführt werden. Abhängig vom Verlauf der Vorverteilungskanäle kann zwischen einem Sternvorverteilungs-, einem $2n$ -Vorverteilungs- und einem längenbalancierten Vorverteilungssystem unterschieden werden. Die Sternvorverteilung ist hierbei die gebräuchlichste Art der Schmelzevorverteilung [Sa11b], [He15].

Nachdem die Kunststoffschmelze den Extruder verlassen hat und durch die Vorverteilung in mehrere Ströme zerteilt wurde, folgt die Übergabe an die Sekundärverteilung. Hier wird durch Überlagerung von Axial- und Umfangsströmen ein kreisförmiges, mechanisch und thermisch homogenes Schmelzeprofil erzeugt. Zu diesem Zweck nimmt die Tiefe der in den Dorn gefrästen, schraubförmigen Wendelnuten kontinuierlich bis auf den Dorndurchmesser ab, wohingegen die Spaltweite zwischen Gehäuse und Dorn zunimmt. Durch die so gestaltete Geometrie nimmt der Anteil des radialen Wendelstroms in Richtung des Werkzeugauslasses mit verringerter Wendeltiefe ab und überlagert sich mit dem zunehmenden axialen Leckstrom. Durch Variieren der in der Abb. 3-6 (links) dargestellten Geometrieparameter wie Durchmesser (D), Bauhöhe (L), Wendelzahl, Wendelsteigung, Kanaltiefe (H), Kanalbreite, Spaltweite (S), sowie durch Veränderung von Details wie Radien, Fasen oder Dichtflächen kann das Resultat hinsichtlich der geforderten Produkteigenschaften angepasst werden.

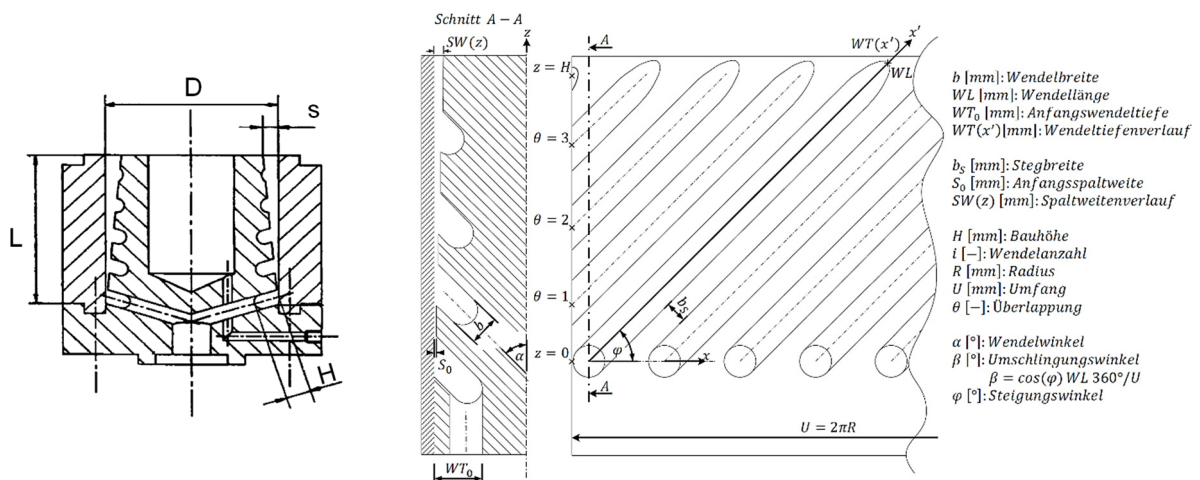


Abb. 3-6: Geometrieparameter eines Wendelverteilers nach [Cr08] (links) und [He15] (rechts)

Die Herausforderung bei der Auslegung, Konstruktion und Fertigung der Wendelverteilerwerkzeuge besteht in der optimalen Abstimmung der voneinander abhängigen Wendeltiefen- und Spaltbreitenverläufe sowie ihrer Querschnittsänderungsverläufe, sodass die optimale Verteilung der Kunststoffschmelze erreicht wird und zugleich die ermittelte Geometrie wirtschaftlich herstellbar ist [HHW13], [HWH15], [He15]. Zur Fertigung der wendelartigen Strömungskanäle wird üblicherweise das Schraubfräsverfahren auf einer 4-Achs-Maschine angewandt. Die Vorteile des Verfahrens liegen vor allem in der hohen Produktivität, den geringen Rüst- und Werkzeugwechselzeiten sowie der problemlosen Späneentsorgung [WiDü06].

Es ist leicht vorstellbar, dass diese Vorgehensweise durch das Vorhandensein eines interdisziplinären Know-hows und großen Erfahrungsschatzes seitens des Auslegungsingenieurs, aber auch durch einen hohen Zeitaufwand sowie hohe Kosten geprägt ist. Aus diesem Grund streben die aktuellen Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet nicht nur eine vollständige Automatisierung des Entwicklungsprozess an, sondern auch die Mitbetrachtung und Implementierung der fertigungstechnischen

Restriktionen, um die zeitintensiven, iterativen und manuell durchgeführten Schritte zu minimieren [KHK11] [SWK12]

3.2 CAD-Modellierungsmethodik und spanende Fertigung

Zum Thema, aus dem realen Fertigungsprozess eine CAD-Modellierungsmethodik abzuleiten, wurden bereits in den 1980er- und 1990er-Jahren einige Ansätze für eine fertigungsgerechte und featurebasierte Modellierungsmethodik entwickelt, welche im Jahre 2003 in die [VDI2218] einmündeten. Betrachtet man jedoch die aktuelle Situation, dann kann festgestellt werden, dass nach wie vor nur elementare fertigungsorientierte Features wie Bohrung, Rundung oder Fase in den CAD-Systemen verfügbar sind, deren Einsatz jedoch über alternative Modellierungsmethoden umgangen werden kann. Für die Fertigungsverfahren wie Drehen, Fräsen und Bohren, welche aufgrund des zu bearbeitenden Werkstoffs, der Werkstückgeometrie und der Stückzahl sehr flexibel einsetzbar sind, fehlt eine eindeutige CAD-Modellierungsmethodik, welche die zerspanungsorientierte Gestaltung der 3D-CAD-Modelle fehlerfrei ermöglicht. Betrachtet man die leistungsstärksten 3D-CAD-Systeme, gibt es keine systeminterne Applikation, die den direkten zerspanungsorientierten Geometrieaufbau unterstützt.

Die Frage, die sich hierbei stellt, lautet, woran die Überführung der fertigungsorientierten Modellierungsmethodik in der Vergangenheit gescheitert ist. Ein wesentlicher Grund ist, dass die CAD-Systeme und die dazugehörigen IT-Systeme in der Vergangenheit nicht die Entwicklungsreife hatten, um solche Modellierungstechniken auch praxistauglich durchführen zu können [Ho01], [Lu09]. Die aktuellen CAD- und IT-Systeme sind jedoch so leistungsstark, dass die beabsichtigte 3D-Produktmodellierung ohne Performanceprobleme durchgeführt werden kann. Der Handlungsbedarf wird anhand einiger Beispiele in folgenden Abschnitten dargelegt.

3.2.1 Zerspanungskonforme CAD-Modelle

Um die im Abschnitt 2.4.4 aufgeführten Vorteile der CAD-CAM-Kopplung nutzen zu können, muss sichergestellt werden, dass die Geometrie des CAD-Modells korrekt ist und mit der Geometrie des Zerspanungsprozesses übereinstimmt. Da einige CAM-Systeme die Möglichkeit bieten, die Werkzeugbahnen anhand von bereits im CAD-Modell vorhandenen Leitkurven manuell zu bestimmen, kann bei einem fehlerhaften CAD-Modell durchaus dennoch ein fehlerfreies Werkstück entstehen. Die dabei entstehenden Abweichungen zwischen CAD-Modell und Fertigteil führen dazu, dass Erkenntnisse aus Simulationen, welche basierend auf dem virtuellen Produktmodell durchgeführt wurden, nicht zwingend auf das gefertigte Werkstück übertragbar sind.

Für die Absicherung der geforderten Modellqualität ist somit nicht nur eine durchgängige Nutzung einer gemeinsamen Datenbasis im gesamten CAD-CAM-Prozess erforderlich, sondern auch die Integration des auswertbaren Fertigungswissens in das 3D-CAD-Produktmodell. Der Hintergrund ist, dass bei der in der Praxis angewandten Vorgehensweise nur ein Bruchteil der integrierten fertigungsrelevanten Informationen vom CAD-Modell direkt für die Erzeugung des NC-Programmes übernommen wird [He11]. Auf diese Problembereiche wird im weiteren Verlauf detailliert eingegangen.

3.2.1.1 Abbilden der Zerspanungsgeometrie in 3D-CAD-Systemen

Die Abbildung der realen Zerspanungsgeometrie wird vom Konstrukteur durch den Einsatz der verschiedenen Standardkonstruktionselemente (KEs), Features und deren Kombination in den 3D-CAD-

Systemen realisiert. Diese basieren grundsätzlich auf der Austragung eines 2D-Querschnitts. Dazu wird zwischen der translatorischen, rotatorischen sowie trajektorischen Austragung unterschieden, deren verschiedene Einsatzzwecke im Folgenden anhand praktischer Beispiele verdeutlicht werden können.

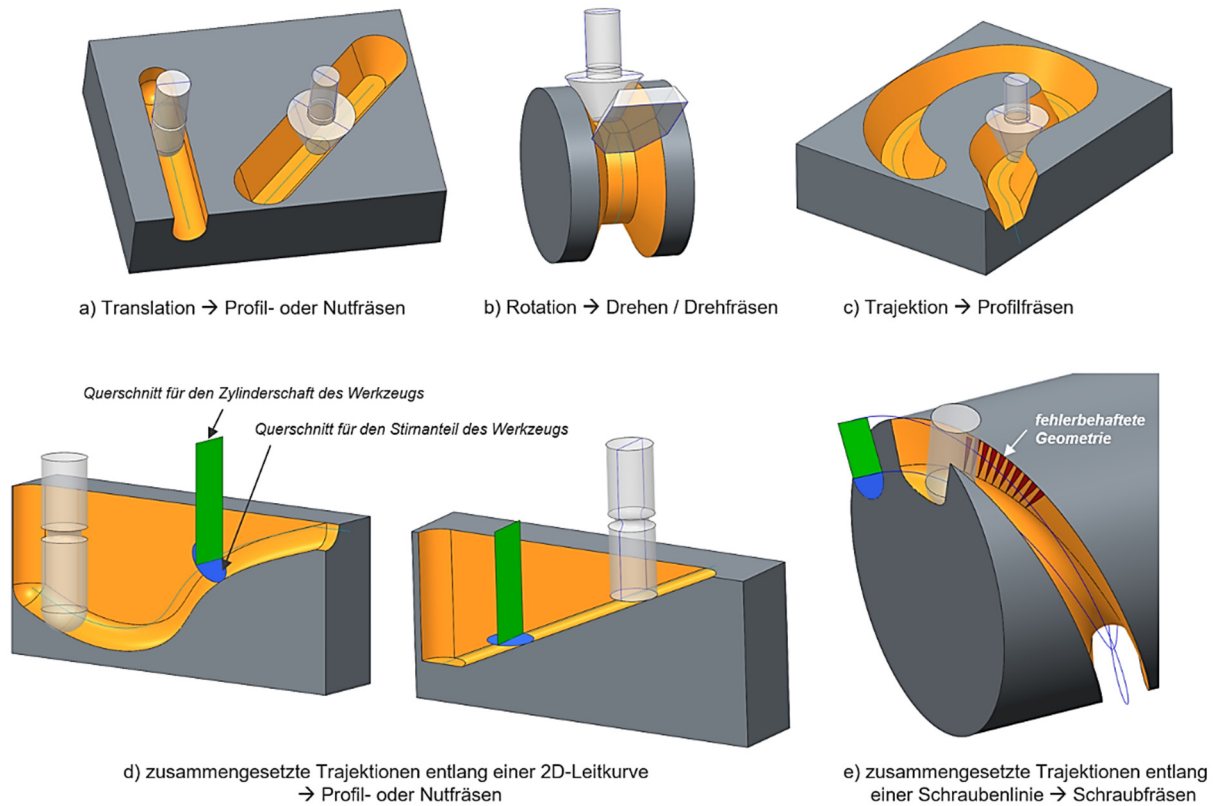


Abb. 3-7: Vergleich des CAD-Feature Geometrie mit der Zerspanungsgeometrie

Für die Beispiele (a)-(c) wird zur Erstellung der CAD-Geometrie ein 2D-Werkzeugquerschnitt entlang einer 2D-Leitkurve bewegt. Solange es sich bei dem Werkzeugverfahrweg um eine Gerade handelt, kann die 2D-Querschnittskontur des Werkzeuges durch eine Translationsbewegung ausgetragen werden. Kreis- bzw. teilkreisförmige Werkzeugverfahrwege können durch eine Rotationsbewegung des Werkzeugquerschnitts realisiert werden, unabhängig davon, ob es sich bei dem Werkzeug um einen Fräser oder einen Drehmeißel handelt. Für komplexere 2D-Werkzeugverfahrwege wird das Ziehen-KE/Sweep-Feature unter Beachtung der verschiedenen Austragungsoptionen, herangezogen. Das Bauteilbeispiel, welches in Abb. 3-7 c dargestellt ist, wird durch Form-Profilfräsen auf einer 3-Achs-Werkzeugmaschine gefertigt. Das Abfahren der dargestellten Leitkurve kann durch die Steuerung von nur zwei der drei Werkzeugachsen (X und Y) realisiert werden (abgesehen von den Zustellbewegungen). Im CAD-System kann dieser Vorgang fertigungsgerecht modelliert werden, indem der schneidende Teil des Werkzeuges durch das Ziehen-KE/Sweep-Feature senkrecht zu der dargestellten Leitkurve ausgetragen wird.

Im Fall (d) ist die geometrische Übereinstimmung durch geschicktes Zusammensetzen unterschiedlich ausgerichteter Trajektionen mit den entsprechenden Werkzeugteilquerschnitten entlang einer 2D-Leitkurve erreicht. In diesem Beispiel wird die Eintauchtiefe des Werkzeugs variabel gesteuert (Z-Achse). Hier ist es erstmals erforderlich, dass die Haupt- und Nebenschneide des zylindrischen Schaftfräasers mit runder Stirn unabhängig voneinander ausgetragen werden. Der Querschnitt des zylindrischen Schaftes wird mit einer konstanten senkrechten Richtung ausgetragen. Als Referenz kann dabei beispielsweise eine Werkstückkante oder eine Achse des Koordinatensystems dienen.

Alternativ kann der Schaft senkrecht zu der Projektion der Leitkurve auf die Bodenfläche des Werkstücks ausgetragen werden. Die Materialentfernung durch die runde Werkzeugstirn wird abgebildet, indem ein Kreis mit dem Werkzeugdurchmesser senkrecht zu der Leitkurve ausgetragen wird. Eine Besonderheit ergibt sich für Werkzeuge mit ebener Stirnfläche. Während die Austragung des Schafts unverändert erfolgt, muss die Nebenschneide entsprechend der realen Werkzeugbewegung ausgetragen werden.

Fall (e) repräsentiert ein Beispiel, wo die CAD-Feature-Geometrie mit der Geometrie des Spanvorgangs beim Schraubfräsen nicht übereinstimmt. Die Ursache hierfür ist der realer Werkzeugeingriff in das Werkstück, welches in der Realität nicht mehr zweidimensional ist. Durch die Trajektion eines Werkzeugquerschnitts entlang einer Schraublinie entsteht im CAD-System eine Wendelnut, die zu schmal ist (siehe Kontrollschnitt in der Abb. 3-7). Je nachdem, wie die räumliche Anordnung des Werkzeugs zum Werkstück ist, ergibt sich beim Schraubfräsen eine unterschiedlich komplexe Geometrie des Zerspanungsvorgangs.

Daraus kann festgestellt werden, dass trotz der Anwendung der in den 3D-CAD-Systemen existierenden formgebenden KEs mit umfangreichen geometriesteuernden Optionen nicht zwangsläufig eine fehlerfreie Geometrie eines Zerspanungsvorgangs abbildet werden kann. Diese Problematik wird in den folgenden Beispielen etwas näher beleuchtet.

3.2.1.2 Beispiel Zylinderschnecke

In der Abb. 3-8 sind beispielhaft zwei Zylinderschnecken dargestellt, deren wendelartige Modellierung von Kanalaustragungen in den 3D-CAD-Systemen über ein einziges Geometriefeature realisierbar ist. Jedoch nicht bei jeder Modellierungsoption entspricht die modellierte Geometrie der Fertigungsgeometrie.

Bezeichnung	Werkzeuge und Werkzeuganstellung	2D-Bild	3D-Modell
Flankenform A (ZA-Schnecke)	<ul style="list-style-type: none"> Drehmeißel mit Trapezprofil Anstellung im Achsschnitt parallel zur Achse 		
Flankenform N (ZN-Schnecke)	<ul style="list-style-type: none"> Drehmeißel mit Trapezprofil, Finger- oder Scheibenfräser Anstellung im Normalschnitt senkrecht zum Lückenverlauf 		

Abb. 3-8: Zylinderschnecken und ihre Herstellungsverfahren

In beiden Fällen wird während der Fertigung ein Drehmeißel mit wendelförmigem Vorschub bewegt, jedoch in unterschiedlichen Werkzeuganstellungen. Wie bereits angedeutet, lässt sich die reale Austragung in den CAD-Systemen über eine räumliche Trajektion realisieren, bei der ein ebener Werkzeugquerschnitt entlang definierter Leitkurven (hier wendelartige Bahnkurven) geführt wird. Die Richtigkeit der Fertigungsgeometrie wird durch eine entsprechende Orientierung des ebenen Querschnittes abgesichert. Zum einen muss im Fall der ZA-Schnecke der Querschnitt senkrecht zur

Rotationsachse und bei der ZN-Schnecke senkrecht zur Leitkurve ausgerichtet werden. Zum anderen muss sichergestellt werden, dass in beiden Fällen zur Fertigung der Schneckenprofile mit entsprechenden Drehmeißeln gearbeitet wird. Würde man abweichend zum Drehmeißel einen Fingerfräser zur Fertigung der ZA- oder ZN-Schenke einsetzen, wird die gefertigte Kanalgeometrie mit der modellierten nicht mehr übereinstimmen. In Abb. 3-9 wird deutlich, dass der Kegelfräser die Flankenlinien schneidet ((a) für ZA-Schnecke und (b) für ZN-Schnecke). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die eingesetzten Meißel so geformt sind, dass die bereits gefertigte Kanalgeometrie nicht beschädigt wird. Der Werkzeugeingriff ist bei der Drehbearbeitung dadurch rein zweidimensional, weswegen die Modellierung durch eine Austragung des ebenfalls 2D-Werkzeugquerschnitts ermöglicht wird. Bei dem Einsatz eines rotationssymmetrischen kegeligen Schaftfräasers kann ein dreidimensionaler Eingriff des Werkzeugs nicht verhindert werden, was darin resultiert, dass sich im Normalschnitt nicht das geradlinige Trapezprofil zeigt. Der Konstrukteur sollte sich über den räumlichen Eingriff des Werkzeugs bewusst sein und seine Modellierungsstrategie entsprechend anpassen oder dies zumindest in den Fertigungsunterlagen vermerken, sodass die in den anschließenden CAE-Prozessen beteiligten Personen in Kenntnis gesetzt sind.

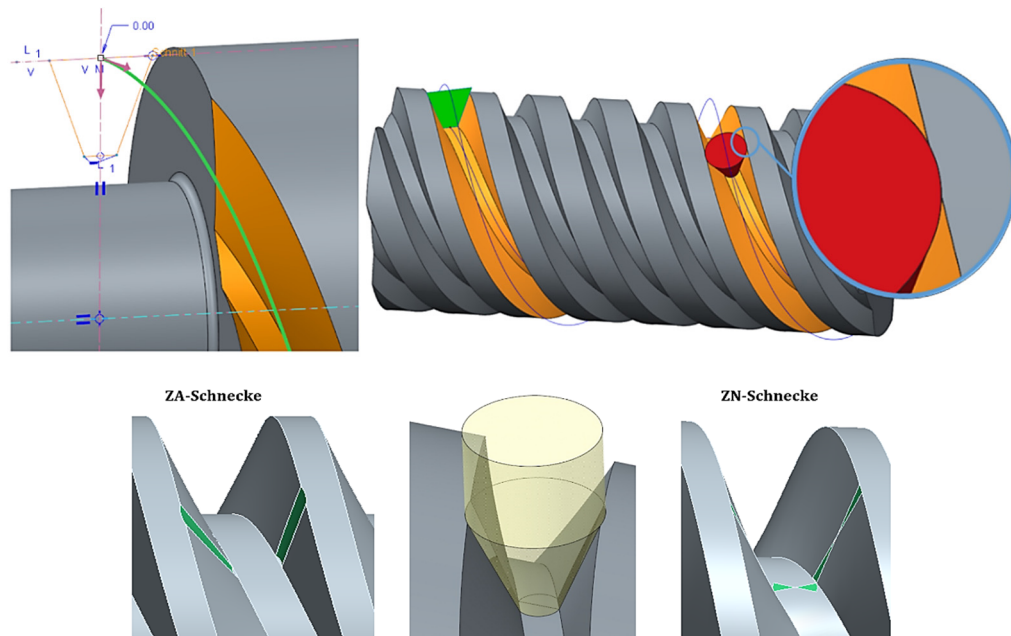


Abb. 3-9: Abweichungen beim Fräsen von ZA- und ZN-Schnecken

Es ist ersichtlich, dass es sich aufgrund des räumlichen Kontakts des Fräswerkzeugs um einen verhältnismäßig stark ausgeprägten Hinterschnitt handelt

Noch problematischer ist es bei der fertigungsgerechten Gestaltung einer ZK-Schnecke mit einer Flankenform K. Zu deren Fertigung werden Schleifscheiben oder Scheibenfräser verwendet, die um den Mittensteigungswinkel γ_m geschwenkt angestellt werden (siehe Abb. 3-10a). Die gefertigte Flanke weist im Normalschnitt eine Krümmung auf, die von dem Werkzeugdurchmesser und der Breite des Werkzeugprofils abhängig ist. In diesem Fall ist eine exakte und fehlerfreie Modellierung dieser Flankenform mit einem Geometriefeature im CAD-System aufgrund des Einflusses des Werkzeugdurchmessers nicht ohne weiteres möglich.

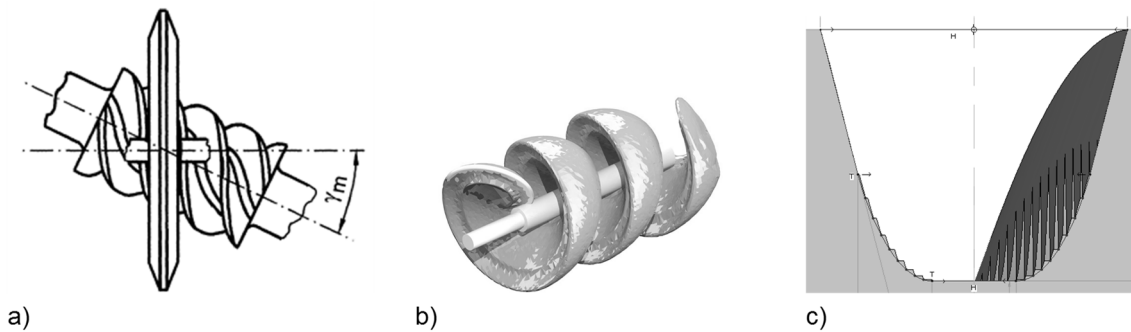


Abb. 3-10: ZK-Schnecke

Ein denkbarer Ansatz besteht darin, eine Bewegungshülle für einen gegebenen Werkzeugdurchmesser zu generieren (siehe Abb. 3-10b). Anschließend kann der Querschnitt, der sich im Normalschnitt der Bewegungshülle ergibt, rekonstruiert werden und über ein räumliches Trajektionsfeature ausgetragen werden. Kritisch zu beurteilen ist dieser Ansatz besonders wegen der mangelnden Genauigkeit sowie des hohen Aufwands, welcher für variierende Werkzeugabmessungen jedes Mal erneut aufgebracht werden muss. Als Alternative zu der Bewegungshülle kann der Materialschnitt für genau eine Werkzeugposition modelliert werden und dieser im Anschluss entlang der Werkzeugbahn gemustert werden. Als Ergebnis wird eine grobe Annäherung an die zu erwartende Materialentfernung erreicht (siehe Abb. 3-10 c), auf deren Basis im Nachhinein ein angenäherter Materialschnitt als eine räumliche Trajektion modelliert werden kann. Das Ziel sollte aber sein, die Zerspanungsvorgänge im CAD-Modell realitätsnah und in verwendbarer Datenqualität abzubilden. Hier versuchen die CAD-Systemhersteller auch nachzubessern (vgl. z. B. Siemens NX 11).

3.2.1.3 Beispiel Wendelverteiler

Nach dem Stand der Technik erfolgt der Entwicklungsprozess des Wendelverteilers in der Praxis immer noch durch Anwendung von Erfahrungswissen in einer iterativen und oft manuellen Vorgehensweise. Hierbei wird eine vordimensionierte Basisgeometrie anhand von Berechnungsansätzen so lange iterativ verändert, bis Zielgrößen, wie beispielsweise eine gleichmäßige Volumenstromverteilung am Werkzeugaustritt, vorliegen (vgl. auch [Sa11b], [He15]). Im letzten Schritt werden die Daten, welche nach der durchgeführten Werkzeugauslegung vorliegen, in ein entsprechendes, fertigungsgerechtes 3D-CAD-Modell überführt, um dann die benötigten Fertigungsdaten (Zeichnungen, NC-Daten etc.) abzuleiten (vgl. Abb. 3-11).

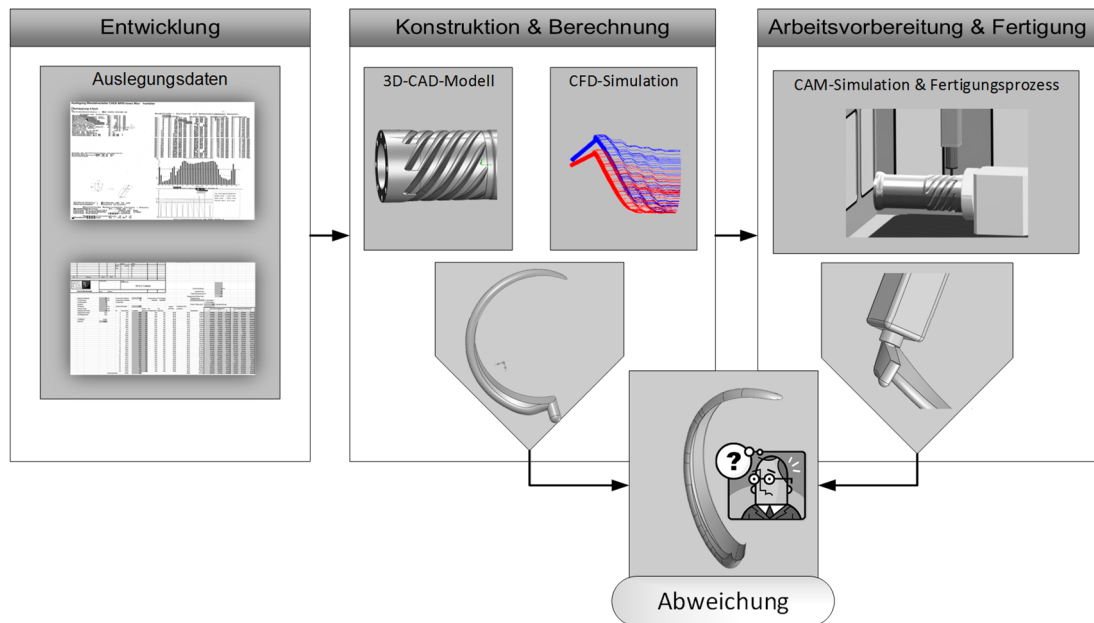


Abb. 3-11: Entwicklungs- und Konstruktionsprozess eines Wendelverteilers

Die fertigungstechnischen Restriktionen werden im Auslegungsprozess meist nicht ganzheitlich berücksichtigt, wodurch eine Anpassung des Modells unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten nötig sein kann. In der Abb. 3-12 wird deutlich, dass die räumliche Anordnung des Fräasers (senkrecht oder schräg zur Rotationsachse des Werkzeugs) entscheidend für eine fertigungsgerechte Modellierung ist.

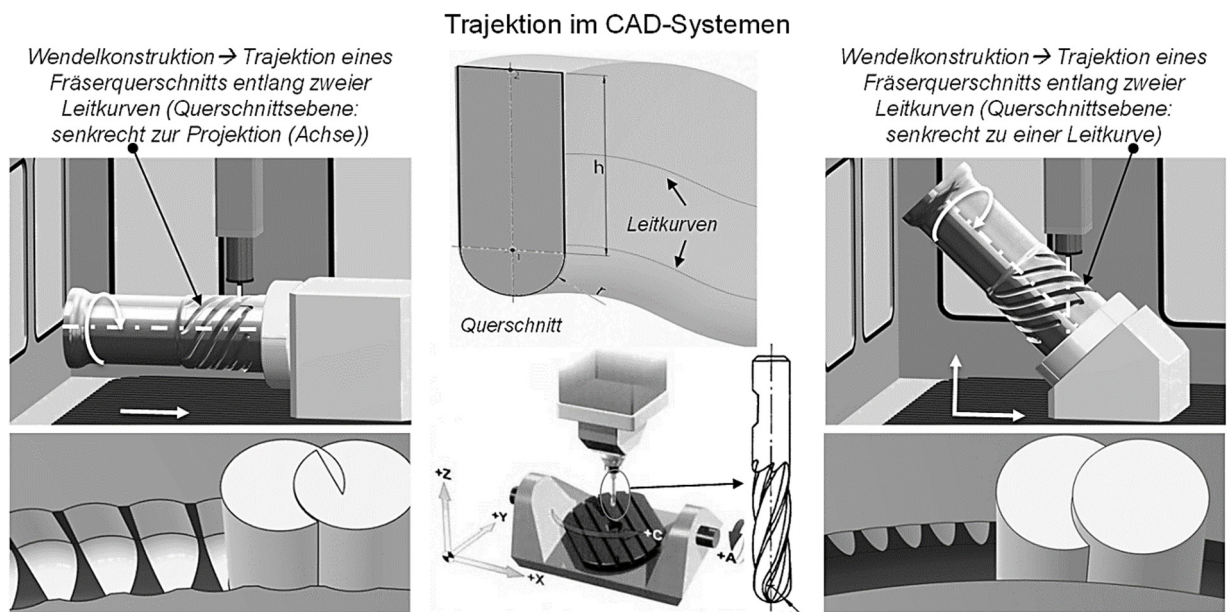


Abb. 3-12: Problematik der zerspanungsgerechten Geometrieabbildung

Der Fertigungsverfahren der Wendel findet in der Praxis vorwiegend auf einer Fräsmaschine mit wendelförmigem Vorschub und mithilfe eines Kugelfräasers statt. Die Anordnung des Fräasers zu dem Werkstück hängt im Wesentlichen von dem rheologisch ausgelegten bzw. optimierten Querschnitt ab. Auch hier werden in den CAD-Systemen für die Geometriegestaltung solcher räumlichen Ausprägungen spanender Fertigungsverfahren die räumlichen Trajektionen (Ziehen-KE/Sweep-Features)

angewandt. Wie in der Abb. 3-12 zu sehen ist, lässt sich mit dieser Vorgehensweise trotz der zu Verfügung stehenden zusätzlichen Steuerungsoptionen die exakte Fertigungsgeometrie nur bedingt als wendelartige Trajektion erfassen und fehlerfrei abbilden, was die Kontrollschnitte zeigen. Die Ursache beruht auf der Tatsache, dass je nachdem wie die räumliche Anordnung des Werkzeugs zum Werkstück ist, sich eine unterschiedlich komplexe Geometrie des Spanungsvorgangs ergeben kann. Somit lässt sich feststellen, dass beim Abbilden des Fräsprozesses rotationssymmetrischer Werkstücke durch die Trajektion eines ebenen Fräserquerschnitts entlang wendelartiger Leitkurven nicht die Geometrie entsteht, die sich beim Fräsen auf einer 4-Achs-Maschine ergibt.

In der Realität liegen der Kugelfräsermittelpunkt und die Fräserachse während der Fertigung in der Achsschnittebene, jedoch nicht die restlichen im Eingriff befindlichen Fräserquerschnitte. Wird der Kanalausrag modelliert, in dem der Fräserquerschnitt in der Achsschnittebene liegt, wird die ausgetragene Kanalgeometrie sowohl im Wendelgrund als auch an den Flanken zu klein, was in der Abb. 3-12 links zu sehen ist. Es ist ersichtlich, dass der Kugelanteil des Fräasers als Kreisquerschnitt auf die Normalschnittebene (senkrecht zur Leitkurve) gelegt werden muss, um die Korrektheit des Schnittes am Wendelgrund zu erreichen. Wird allerdings auch der zylindrische Anteil im selben Querschnitt mitgezogen (entlang der gleichen Leitkurve), würde die Flankengeometrie zwar etwas besser, jedoch nicht fehlerfrei. Gleiches gilt auch für den schräg gestellten Fräser, bei dem das Querschnittsprofil in der Normalebene gekippt wird (Abb. 3-12 rechts). Beim Kontrollschnitt fällt auf, dass die Flanke deutlich beschädigt wird, was darauf hindeutet, dass der modellierte Kanal im Vergleich zum realen Kanal zu eng ist.

Die in den letzten Jahren entwickelten Ansätze zur automatisierten Auslegung und ganzheitlichen Betrachtung des Dimensionierungs- und Optimierungsprozesses von Extrusionswerkzeugen [Sa11b], [He15] finden gerade den Eingang in die Praxis. Die dort präsentierten Ansätze wurden gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Rechnereinsatz in der Konstruktion und dem Lehrstuhl für Konstruktion und Kunststoffmaschinen (KKM) an der Universität Duisburg-Essen im Rahmen öffentlich DFG-geförderter Forschungsvorhaben erarbeitet.

Alle bereits genannten Beispiele sowie ihre Fertigungsabläufe verdeutlichen, dass sich je nach Werkzeugform, räumlicher Anordnung des Werkstücks, Auswahl des Fertigungsverfahrens mehr oder weniger komplexe Geometrien der Spanungsvorgänge ergeben können. Oft handelt es sich hier um Regel-, Dreh-, Schraubenflächen und ihre Entartungen, die als Beweigflächen von Werkzeugschneiden entstehen und deren Hüllflächen zu ermitteln sind.

3.2.1.4 Gestaltung der Bewegungshüllen in 3D-CAD-Systemen

Das Thema fertigungsgerechte Geometriemodelle, welche die fehlerfreie Darstellung spanender Bearbeitungen ermöglichen sollen, ist seit Jahren Gegenstand der Forschung und konzentriert sich vor allem auf die Beschreibung von Bewegungshüllen für unterschiedliche Werkzeuggeometrie. Neben der Lösung geometrischer Probleme während der Konstruktion sind die Kollisionsüberprüfung bei der NC-Programmierung oder die Optimierung und Verifikation von NC-Programmen dabei wichtige Anwendungsbereiche [Ar09]. Aus mathematischer Sicht ist die Thematik der Hüllflächen von Werkzeuggeometrie schon häufiger in der Fachliteratur behandelt worden, z. B. [Bä84], [HLH92], [LeCh06], [Mo07], [Me08], [LHC08], [ChCa08], [Le06], [Ar09], [Le09], [LiZh14]. Die dort beschriebenen Ansätze zeigen einige Möglichkeiten zur analytischen bzw. differentialgeometrischen Flächenbeschreibung einzelner Flächenarten auf, die allerdings vom Anwender eines CAD-Systems nicht ohne Weiteres umgesetzt werden können, da häufig nur begrenzte Möglichkeiten zur Anpassung der rechnerinternen Geometriebeschreibung bestehen.

In den leistungsstarken CAD-Systemen lassen sich Bewegungshüllen mithilfe von integrierten Mehrkörpersimulationstools (MKS) ermitteln, jedoch werden diese nur als triangulierte Flächen- bzw. Volumenmodelle dargestellt (siehe Abb. 3-13).

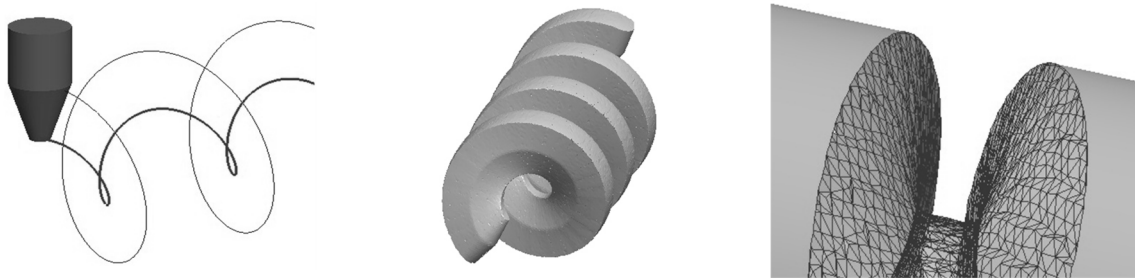


Abb. 3-13: Bewegungshülle

Um eine exakte Fertigungsgeometrie mithilfe eines Geometriefeatures in einem 3D-CAD-Modell abbilden zu können, müsste dem Konstrukteur eine räumliche Trajektion von Volumenkörpern ermöglicht werden. Dies ist allerdings in den heutigen CAD-Systemen immer noch sehr problematisch bzw. kaum möglich. Der erwähnte Ausweg über die Gestaltung der Bewegungshüllen ist aufgrund der Datengröße und Qualität auch nicht zufriedenstellend bzw. für weitere CAE-Prozesse wie z. B. Strömungssimulation nicht geeignet. Somit ist die Entwicklung einer allgemeingültigen CAD-Methodik zur Gestaltung schraubgefräster Bauteile in den CAD-Systemen eine logische Schlussfolgerung der dargelegten Analyse.

3.2.2 Betrachtung der CAD-CAM-Features

3.2.2.1 Korrelation zwischen den CAD- und CAM-Features

Die Korrelation zwischen den CAD- und CAM-Features ist ein jedem CAD- und CAM-Experten bekanntes Problem, welches direkt mit der CAD-Modellierungsmethodik und der Integrationstiefe der beiden Systeme eng verbunden ist. Die heutige neben der featurebasierten Modellierungsstrategie oft favorisierte Art der völlig freien und flexiblen Modellierung soll zwar der kreativen Gestaltungsfreiheit des Konstrukteurs mehr Freiraum lassen, führt jedoch mitunter dazu, dass die Modellqualität zu stark von subjektiven Faktoren abhängig ist. Dies führt zu enormen Problemen und damit zu Zeitverzögerungen und Kostensteigerungen bei der Überführung des CAD-Modells in die CAM-Umgebung [St07]. Mit diesem Problem haben nicht nur die eigenen Unternehmensbereiche zu kämpfen, sondern auch die beauftragten Lohnfertiger. Nicht selten investieren diese viel Zeit, um das Modell dahingehend zu optimieren, dass eine vernünftige Überführung in die CAM-Umgebung ermöglicht wird. Eine gute Überführung ist gewährleistet, wenn die aus den CAD-Modellen zu fertigenden Form-Features automatisch über Feature-Erkennung und ihre Tools erkannt werden können [Ne99], [BeMü99], [WZ07]. Einige CAM-System-Hersteller wie z. B. Tebis oder Mastercam bieten Lösungen für eine automatisierte Überführung der CAD-Geometrie in die CAM-Umgebung an. Die erkannten Features und/oder Geometrieelemente werden mit den CAM-System-spezifischen Fertigungs-Features gepaart (Feature-Mapping), sodass die enthaltenen geometrischen und technologischen Parameter für die Fertigungsplanung und NC-Programmierung genutzt werden können. Somit lassen sich Fehler durch manuelles Übertragen von Fertigungsinformationen minimieren und die Sicherheit des virtuellen Fertigungsprozesses kann damit gesteigert werden. Diese Lösung beschränkt sich jedoch meist auf die Bearbeitung von sog. Standardgeometrieelementen (planare,

zylindrische oder konische Flächen) über 2,5-D-Bohr- und Fräsbearbeitungsprozesse. Die Leistungsfähigkeit ist vom Softwaresystem zu Softwaresystem unterschiedlich (vgl. auch [PL14]) und hängt von der Leistung der Schnittstelle und den implementierten Algorithmen zur Feature-Erkennung und Feature-Mapping ab. Aus dieser Sicht ist eine vollständig integrierte CAD-CAM-Lösung am leistungsstärksten. Um die Potenziale solcher CAD-CAM-Lösungen vollständig auszuschöpfen, sind neben den Geometriemodellierungsmethoden weitere CAD-Methoden erforderlich, welche eine fertigungsorientierte CAD-Modellierung unterstützen.

3.2.2.2 Normgerechte und fertigungsorientierte CAD-Features

Normgerechte und fertigungsorientierte Features sind teilweise neben den Geometrie- und Form-features bereits in CAD-Systemen integriert. Es können beispielsweise bei einer Gewindebohrung bereits vordefinierte Normreihen berücksichtigt werden. Für den Fall einer speziellen nicht genormten Bohrung können auch innerhalb des Features weitere Bohrungsparameter, wie der Spitzenwinkel des verwendeten Bohrers sowie eine eventuell erforderliche Kegel- oder Stirnsenkung definiert werden.

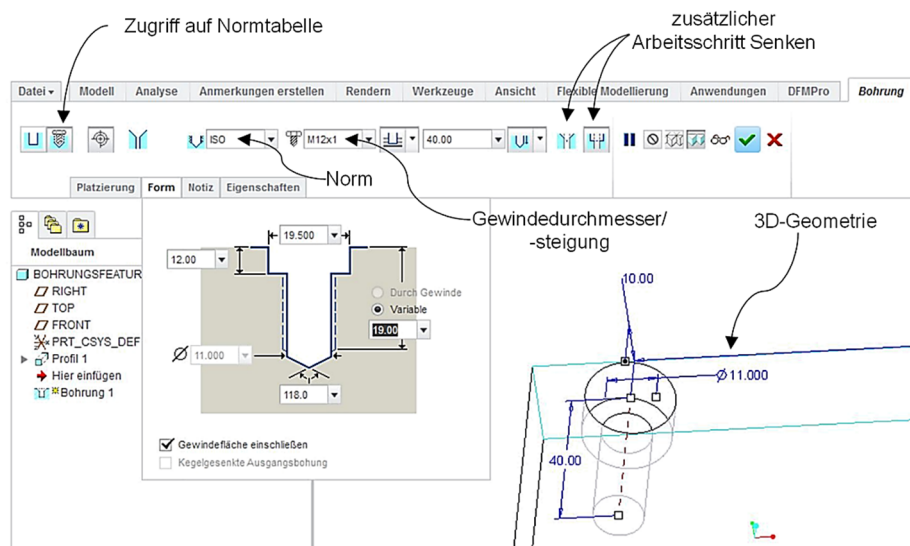


Abb. 3-14: Bohrungsfeature im CAD-System Creo 2.0

Hinter dem fertigungsorientierten Bohrungsfeature in der CAD-Umgebung verbergen sich drei reale Fertigungsschritte: Bohren, Senken und Gewindeschneiden, welche allerdings keine Informationen über die einzusetzenden Werkzeuge oder ihre Reihenfolge aus dem CAD-Feature erhalten. Das betrifft auch die semantischen CAD-Features wie z. B. geometrische Toleranzen (Form- und Lage), Oberflächenbeschaffenheitsangaben oder Oberflächengüte eines Werkstückbereichs, welche eine große Fertigungsrelevanz besitzen. Aber nicht einmal diese fertigungsrelevanten Informationen aus den semantischen CAD-Features werden im Folgeprozess standardmäßig von den an das CAD-System direkt gekoppelten CAM-Umgebungen automatisch erkannt und verwendet.

Betrachtet man zusätzlich zu den Standard-Features weitere benutzerdefinierte Features (UDFs) wie z. B. standardisierte und genormte Features zur Gestaltung von Getriebewellen, ist der Informationsgehalt in den meisten Fällen sehr gering. Die über verschiedene Internetportale (TraceParts, 3Dpartlib oder CADENAS) zur Verfügung gestellten digitalen Kataloge liefern vorwiegend nur Geometrie-Features mit den genormten Abmaßen. Die gewünschte geometrische Ausprägung der Features ist allerdings vom Konstrukteur anhand von entsprechenden Bestimmungsverfahren und

DIN-Normen vorher zu ermitteln. Im Falle eine Getriebewelle basiert die Bestimmung weiterer Wellenelemente wie z. B. der Freitische, Passfeder- oder Sicherungsnuten vorrangig auf dem jeweiligen Absatzdurchmesser. Es besteht eine Abhängigkeit zwischen der Abmessung sowie den Toleranzen des Wellenelementes und dem Absatzdurchmesser. Diese Informationen werden weder in den UDFs festgehalten noch wird der Konstrukteur bei der Auswahl der richtigen Instanz im CAD-System unterstützt. Auch hier sind die Fertigungsinformationen über die Fertigungsstrategie und einzusetzenden Werkzeuge nicht vorhanden.

Die letzte Gruppe der Features stellen die „reinen“ Fertigungsfeatures. Gemeint sind die Features, welche aus der Funktionssicht die Konstruktionsabsicht nicht beeinflussen, da sie konstruktiv nicht erforderlich sind, welche aber enormen Einfluss auf die Fertigungsstrategie des Bauteils haben. Im Kontext der Getriebewelle ist das z. B. das Zentrierbohrung-Feature. Obwohl sich bei einer Zentrierbohrung um ein Bohrungsfeature unterschiedlicher und formabhängiger Querschnittsgeometrie (Form A, B, C, R) handelt, stehen diese dem Konstrukteur nicht standardmäßig in den CAD-Systemen zur Verfügung. Die Integration des Features wäre jedoch unproblematisch und über das Bohrungs-Feature mit genormten Größen abzubilden. Dabei wäre die Unterstützung des Konstrukteurs beim Treffen von Entscheidungen über die Notwendigkeit des Features im Rahmen der Konstruktionsaufgabe und bei der Dimensionierung wünschenswert.

Eine beispielhafte Entwicklung der fertigungsgerechten Features mit dem CAD-System Creo/Elements Pro ist in der Publikation von HOQUE at al. gegeben[HHP13]. Neben der entwickelten Feature-Strategie wurden auch einige fertigungsrelevante Richtlinien zur Gestaltung der CAD-Modelle implementiert sowie einige werkzeuggeometriebedingte Regeln zur Bestimmung und Überprüfung der geometrischen Abmaße der Features abgeleitet (vgl. auch Abb. 3-15).

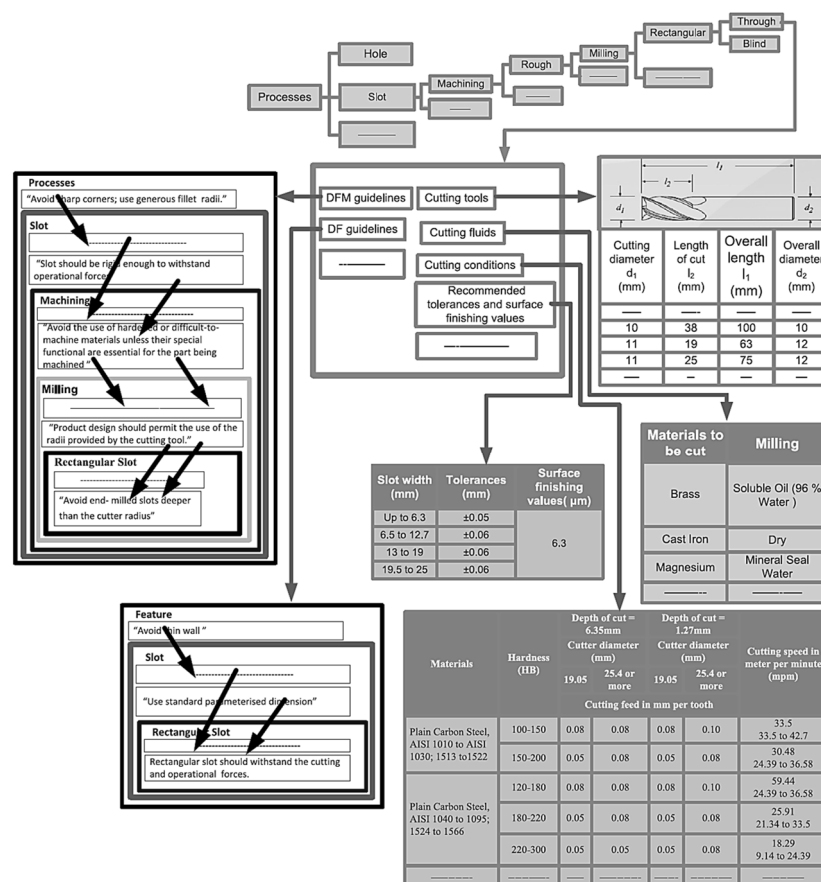


Abb. 3-15: Hierarchical manufacturing feature structure [HHP13]

Das wesentliche Ziel des Ansatzes ist die Entwicklung eines intelligenten Systems für fertigungsorientierte Features im CAD-CAM-Bereich im Kontext der konventionellen Fertigung für Drehen, Bohren und Fräsen. Im Fokus steht hier vor allem das Zusammenbringen der Konstruktions- und Fertigungsphase über eine Schnittstelle zwischen Konstruktions- und Fertigungsdaten und eine Bibliothek von Fertigungsfeatures. Hierzu wurden im ersten Schritt die in der Vergangenheit entwickelten Ansätze verschiedenster Teilprobleme analysiert zusammengefasst (vgl. Tabelle 3-1)

Tabelle 3-1: Some studies on actual manufacturing information in product design[HHP13]

Authors/developer	Research nature	Remarks
Brunetti and Golob (2000)	Feature based conceptual design system	The system can capture the relevant product semantics of the early design phase which allows reusing this information in manufacturing phase
Choi et al. (2001)	Feature based modelling system software for generating set-up and machining sequence	The system required to integrating the encapsulate system and machining system into one automated system
Öztürk and Öztürk (2001)	Neural network based feature recognition approach	The approach does not consider the machining requirements of each component
Zhao, Ridway, and Al-Ahmari (2002)	Concept of turning operation for the integration of a CAD system and knowledge based system	This concept is only capable for the selection of cutting tools and conditions
Zha and Du (2002)	STEP-based method for concurrent integrated design and assembly planning	The model facilitates the exchange of product model data in standardized format
Subrahmanyam (2002)	Finding machining and fixturing feature from the design feature	Maximum forces and moments generated are primary used to find fixturing features for drilling and milling processes
Butdee (2002)	Hybrid feature modelling concept	The concept is only for spot shoe sole design to reduce design lead time
Fu, Ong, Lu, Lee, and Nee (2003)	Identify design and manufacturing features from a data exchanged part model	The feature panorama is briefly expressed from the viewpoint of product design and manufacturing to assist feature identification and extraction
Chen, Wen, and Hob (2003)	Extraction of geometric characteristics in feature-based manufacturability assessment	They focus on evaluating a design and modifying or re-designing it into one that is functionally acceptable and compatible with a selected manufacturing process of separate parts with highlighting on a net shape Process— injection moulding
Howard and Lewis (2003)	Developed an expert system which is linked into a 3D design package	The system provides an analysis of alternate methods of manufacture for producing the design
Muljadi, Ando, Takeda, and Kanamaru (2004)	Development of feature library of a process planning system	Further works required to be through on how the extracted manufacturing information to produce manufacturing features
Muljadi, Takeda, and Ando (2006, 2007a, 2007b)	Semantic Wiki for the development of the feature library	The library consists of the function feature ontology, the manufacturing feature ontology and the manufacturing information
Molcho et al. (2008)	CAM analysis tools	It has only facilities for modification, capture and implementation of manufacturing knowledge in the design stage
Riou and Mascle (2009)	Product dynamic model and design for X solution	It is a data structure based on the B-rep model topology
Marchetta and Forradellas (2010)	Hybrid procedural/knowledge-based approach	This feature recognition system has some limitations
Kerbrat, Mognol, and Hascoët (2011)	Integration of manufacturing entities at design stage	The system is used for reducing time and cost; improving quality and flexibility
Li and Li (2011)	Part information model based on manufacturing feature	This model is created on the basis of geometric model
Pobošniak (2012)	Object database of manufacturing feature oriented part model	It represents the work-piece on the logic level of the database in the form of simple and complex manufacturing features
Boothroyd and Dewhurst (1992)	Commercially developed DFM and assembly DFMA methodology	It focuses on eliminating inefficiency in design, simplifying the structure, reducing cutting costs and quantifying improvements
SIGMAXIM (online)	Developed the Smart Library software for Creo	Only design features are used
Tebis (online)	Develops CAD/CAM systems for tool, die and mould manufacturing	Lack of manufacturing information like DFM, DFA, and DF

In dem präsentierten Ansatz wird die Betrachtung der „klassischen“ Normung der Features nicht direkt einbezogen. Des Weiteren werden zwar die Informationen über die Prozessschritte und vor allem die Prozessparameter für die Dimensionierung und Überprüfung der Features teilweise einbezogen, jedoch den Features nicht konsequent weitergegeben. Auch die Korrelation zwischen den CAD- und CAM-Features wurde dort nicht thematisiert.

Somit soll das Ziel sein, die Informationen, die in dem virtuellen Bauteil vorhanden sind, so zu erfassen und vorzubereiten, dass sie in Folgeprozessen weiterverwendet werden können. Im Sinne der angestrebten Produktivitätssteigerung soll es möglich sein, die fertigungsrelevanten Informationen aus den CAD-Features mit den möglichen Arbeitsschritten und Werkzeugen zur Herstellung der Bauteile zu koppeln, um diese im nachgeschalteten CAM-Prozess automatisch nutzen zu können.

3.3 Fertigungsorientierte Geometrieanalyse der 3D-CAD-Daten

In Bezug auf die im Abschnitt 2.4.3 vorgestellten Softwaretools zur Analyse der 3D-CAD-Modelle hinsichtlich fertigungsgerechter Geometrie und der fertigungstechnischen Restriktionen konventioneller Fertigungsverfahren werden an dieser Stelle zwei ausgewählte Vertreter analysiert.

Dazu wird ein Beispiel für eine fehlerbehaftete Getriebewelle herangezogen, welche in Abb. 3-16 dargestellt ist.

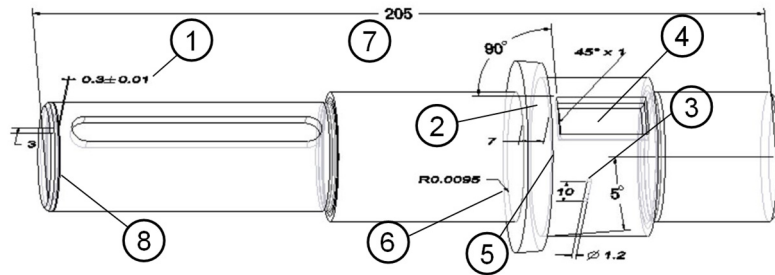


Abb. 3-16: Fehlerhaftes Wellenmodellbeispiel

Die fehlerhaften Konstruktionselemente, welche in dieser Weise gar nicht oder nur mit hohem Aufwand bzw. hohen Kosten hergestellt werden können, stehen in Widerspruch mit der Fertigungsgerechtigkeit und sind mit den Positionsnummern 1-8 gekennzeichnet. Diese Verstöße gegen verschiedene Gestaltungsrestriktionen werden nachfolgend kurz erläutert.

Das mit Position 1 gekennzeichnete Maß für die Einstichtiefe wurde mit einem zu geringen Toleranzbereich versehen, welcher mit herkömmlichen Drehverfahren nicht eingehalten werden kann. Für die Sicherstellung der Maßhaltigkeit sind zum Beispiel Nachbearbeitungsverfahren vonnöten, welche die Kosten stark erhöhen können. Der Konstrukteur sollte an dieser Stelle überlegen, ob solch ein enges Toleranzfeld für die Funktion notwendig ist, und seine Konstruktion ggf. anpassen.

Der Wellenabsatz Position 2 dient dem Spannen des Rohlings im Spannfutter der Drehmaschine. Die Spannstellen sollen zylindrisch und mindestens 10 mm breit sein. Die Spannfläche des Beispielmodells ist in kegeliger Form und 7 mm breit. Auch hier gilt, dass die Geometrie grundsätzlich herstellbar ist, jedoch muss aufgrund des hohen Aufwandes für das Einspannen über alternative Lösungen nachgedacht werden.

Die mit Position 3 gekennzeichnete Bohrung soll im Anschluss an den Drehvorgang mittels Bohrverfahren erzeugt werden. Die dargestellte Geometrie verstößt hierbei gleich gegen mehrere in Abb. 3-17 dargestellte Gestaltungsrichtlinien. Zunächst wurde kein genormter Standarddurchmesser verwendet, wodurch der Einsatz von Sonderwerkzeugen erforderlich wird. Weiterhin ist das Verhältnis von Bohrlochlänge zu Bohrlochdurchmesser zu groß, was ein „Wandern“ des Bohrers und schlimmstenfalls einen Werkzeugbruch zur Folge haben kann. Zuletzt hat die Bohrung im Beispielmmodell einen ebenen Bohrgrund, wodurch zusätzliche Arbeitsschritte zur Fertigung erforderlich werden.

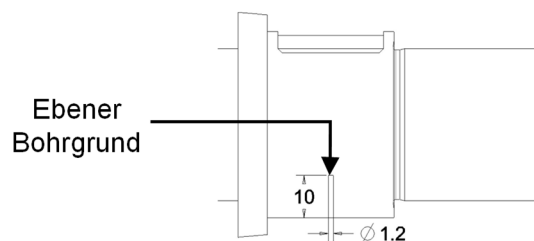


Abb. 3-17: Wellenmodell: Bohrvorgang

Die Passfedernut (Position 4) wird im Anschluss an das Drehen der Welle mittels Fräsverfahren erzeugt. Zwischen den Seitenwänden wurden im Rahmen der Konstruktion scharfe Kanten und zwischen Seitenwand und Boden Fasen vorgesehen (vgl. Abb. 3-18). Beide Geometrien sind aufgrund der Werkzeugform nicht erzeugbar. Es ist auch kein Grund ersichtlich, eine Passfedernut auf diese Weise zu gestalten, da dies der Funktion in keiner Weise zuträglich ist.

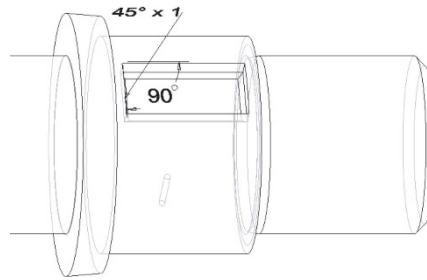


Abb. 3-18: Wellenmodell: Fräsvorgang

Die Absatzkante an Position 5 ist mit einer scharfen Kante und an Position 6 mit einer Rundung, deren Radius kleiner als der Eckradius des Drehmeißels ($R_{\min}=0.1 \text{ mm}$) ist, versehen. Die Innenkanten sind beim Drehen abhängig vom Eckenradius des Drehmeißels, wodurch die Fertigung von 90° Absatzinnenkanten oder Radien kleiner als der Eckenradius des Drehmeißels nicht realisierbar sind. An Funktionsabsätzen ist es ratsam, Freistiche vorzusehen, damit die aufgeschobenen rotierenden Bauteile gegen den Absatz gestützt werden können.

Aufgrund der Schnitt- und Vorschubkräfte beim Drehvorgang entsteht eine Bauteilverformung, die neben der Höhe der Verformungskräfte und deren Hebelarmen vom E-Modul des eingesetzten Materials und vom Querschnitt des Bauteils abhängt. Vereinfacht lässt sich sagen, dass ein bestimmtes Verhältnis von Bauteillänge und kleinstem Bauteildurchmesser nicht überschritten werden darf, da sonst die Gefahr einer relevanten Soll-Ist-Abweichung der erzeugten Geometrie besteht. Die mit Position 7 gekennzeichnete Bauteillänge ist im Verhältnis zum kleinsten Bauteildurchmesser mit $\frac{L}{d} = 8,5$ zu groß, da das Verhältnis einen festgelegten Grenzwert nach VDI-Richtlinie [VDI3206] überschreitet. Für die Sicherstellung der fertigungsgerechten Modellierung müssen entweder die Geometrie angepasst oder durch zusätzlichen Einsatz von Reitstöcken und Lünetten eine Einhaltung der geforderten Toleranzen gewährleistet werden.

Der mit Position 8 gekennzeichnete Einstich für den Einsatz eines Sicherungsringes weist ein Verhältnis der Einstichtiefe zur Einstichbreite von 10 auf (vgl. Abb. 3-19). Empfohlen wird jedoch ein Wert unterhalb von 6, da die Stabilität des Werkzeuges, wie auch bei sehr langen und dünnen Bohrungen, nicht gewährleistet werden kann [Go14].

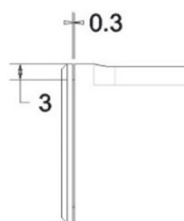


Abb. 3-19: Wellenmodell: Einstechvorgang

Mithilfe des Beispiels einer Getriebewelle und der in Abb. 3-16 mit Position 1-8 gekennzeichneten Geometrieelemente werden die Softwaretools ModelCHECK und DFMPPro untersucht.

3.3.1 Bauteilanalyse mit PTC ModelCHECK

PTC Creo ModelCHECK gilt als Vertreter der in dem Abschnitt 2.4.3 klassifizierten Softwaretools der ersten Kategorie zur Überprüfung der 3D-CAD-Modelle. Es handelt es sich hier um eine integrierte

Anwendung, in der die festgelegten Konstruktionsstandards auf Basis mehrerer Konfigurationsdateien überprüft werden können. Die Verknüpfung der erforderlichen Dateien wird in Abb. 3-20 dargestellt.

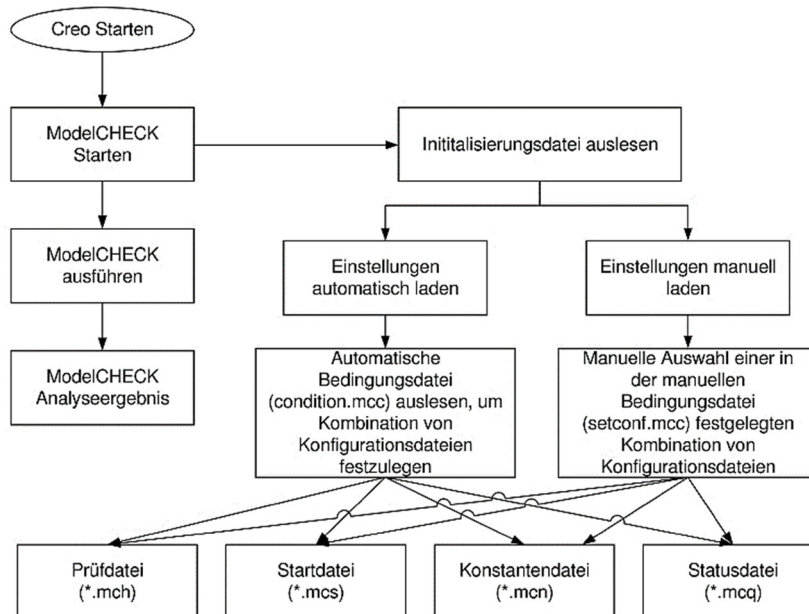


Abb. 3-20: Programmablaufplan bei ModelCHECK

Der Anwendungsbereich von ModelCHECK umfasst:

- das Analysieren von Teilen, Zeichnungen und Baugruppen,
- die Überprüfung der Einhaltung von Standards und entsprechender Modellierungsverfahren mit sofortiger Kennzeichnung von Verletzungen,
- das Darstellen der Analyseergebnisse mithilfe eines dynamischen HTML-Berichts mit Verbesserungsvorschlägen und
- die Unterstützung des Konstrukteurs bei der Verwendung von standardmäßigen Konstruktionsverfahren.

Zusätzlich zu den vordefinierten Prüfregele bietet ModelCHECK auch die Geometrieanalyse eines Modells nach VDA-Empfehlung [VDA4955] (z. B. über „GeomIntegrityCheck“). Des Weiteren lassen sich über sog. RuleCHECKs angepasste Checklisten mit Konstruktionsvorgaben und einem Modelltyp verknüpfen. Dies ermöglicht ergänzend zu der automatisierten Geometrieüberprüfung, die Norm- und Fertigungsgerechtheiten eines CAD-Modells zu überprüfen.

Für das automatisierte Detektieren der Modellierungsfehler bei dem Wellenmodell mithilfe von ModelCHECK ist die Anzahl der theoretisch anwendbaren Prüfungen begrenzt. Aus diesem Grund ist es notwendig, den Funktionsumfang dieser Software durch Zweckentfremdung einiger Prüfungen zu erweitern. Beispielhafte und für das Beispiel relevante Prüfungen mit dazugehörigen Positionsnummern aus Abb. 3-16 sind in Abb. 3-21 aufgeführt und den fehlerhaften Geometrien zugeordnet.

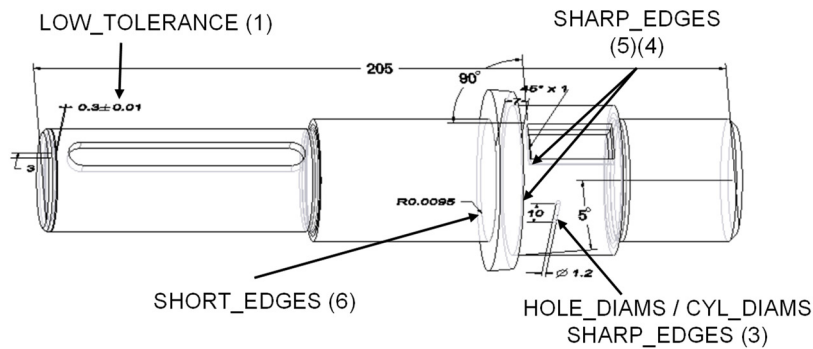


Abb. 3-21: ModelCHECK Prüfungen eines 3D-Getriebewellemodells

Mithilfe der Prüfung „*LOW_TOLERANCE*“ lassen sich beispielsweise die Nuten und Schnitte in einem Modell einem Soll-Ist-Abgleich unterziehen. Sollte ein Toleranzfeld unterhalb des gewünschten Minimalwertes liegen, wird der Anwender mit einer Meldung darauf hingewiesen. Die in Abb. 3-16 mit Position 1 gekennzeichnete zu enge Toleranz für die Einstichtiefe lässt sich auf diese Weise voraussichtlich als Modellierungsfehler anzeigen.

Die Prüfung „*SHARP_EDGES*“ dient in ihrem eigentlichen Anwendungszweck dem Detektieren von scharfen Kanten mit einem Kantenwinkel unterhalb eines sehr kleinen, vom Anwender definierten Wertes. Es ist allerdings denkbar, durch die Festlegung eines Minimalwertes von über 90° alle Kantenwinkel unterhalb dieses Wertes anzeigen zu lassen. Die Konstruktion von Kanten im rechten Winkel widerspricht in vielen Fällen den Gestaltungsrestriktionen. Bezogen auf das Wellenmodell könnten auf diese Weise die scharfe Kante zwischen den Seitenwänden der gefrästen Nut (Position 4), die scharfe Kante am Funktionsabsatz (Position 5) und der ebene Bohrgrund (Position 3) angezeigt werden. Natürlich werden auch Elemente, die aus fertigungstechnischer Sicht unproblematisch sind, wie zum Beispiel Außenkanten mit einem Winkel kleiner 90° oder Kanten zwischen Seitenwand und Boden gefräster Nuten, als fehlerhaft angezeigt. Dennoch kann der Anwender mithilfe dieser Prüfung dazu gebracht werden, erneut über seine Entscheidungen zu reflektieren. Somit kann die Wahrscheinlichkeit eines Konstruktionsfehlers verringert werden.

Mit den Prüfungen „*HOLE_DIAMS*“ und „*CYL_DIAMS*“ wird dem Anwender die Möglichkeit geboten, alle Bohrungsdurchmesser, die nicht in einer Liste von zugelassenen Durchmesserreihen enthalten sind, anzuzeigen. Beide Prüfungen greifen hierbei auf dieselbe Liste mit Bohrungsdurchmessern zurück, wobei „*HOLE_DIAMS*“ für die Überprüfung von mit dem Bohrungstool erzeugter Geometrie und „*CYL_DIAMS*“ für alle zylinderförmigen Materialschnitte programmiert ist. Mithilfe dieser Prüfungen sollte somit der nicht standardisierte Bohrungsdurchmesser an Position 4 angezeigt werden können.

Zum Detektieren kurzer Kanten im Modell kann die Prüfung „*SHORT_EDGES*“ herangezogen werden. Mit der Festlegung einer maximalen Kantenlänge, unterhalb der eine Fehlermeldung ausgegeben wird, lassen sich auch fehlerhafte Radien (Position 6), deren Bogenmaß unterhalb der minimalen Kantenlänge liegt, erfassen.

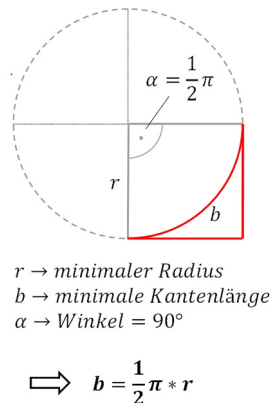


Abb. 3-22: Umrechnung für ModelCHECK-Prüfung „SHORT_EDGES“

Damit ein genauer Grenzwert, z. B. abhängig vom Eckradius des Drehmeißels, festgelegt werden kann, wäre eine Umrechnung von Radius in Kantenlänge, wie in Abb. 3-22 beispielhaft dargestellt, notwendig. Davon ausgehend, dass es sich um Tangentialverrundungen handelt, wird in diesem Beispiel ein Winkel von $\alpha=90^\circ$ angenommen. Mit diesem Winkel und dem minimal fertigbaren Radius (Eckradius des Drehmeißels) lässt sich das Bogenmaß errechnen. Hinterlegt man dieses als Minimalwert für die Kantenlänge, sollten alle Radien kleiner dem Minimalradius erkannt und daraufhin markiert werden. Wie auch bei der Prüfung „SHARP_EDGES“ werden wahrscheinlich nicht nur die fehlerhafte Geometrie, sondern auch Elemente, die unkritisch sind, wie kleine Außenradien oder Innenradien, die durch einen Fräsvorgang erzeugt werden, angezeigt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass eine umfassende Geometrieprüfung mit ModelCHECK nicht möglich ist. Dennoch belegen die beschriebenen Prüfmöglichkeiten, dass die technischen Voraussetzungen hierzu vorhanden sind. Die Implementierung zusätzlicher Prüfungen für eine fertigungsgerechte Konstruktion sowie das Erweitern des Funktionsumfangs um die Möglichkeit der Programmierung individueller Prüfungen wäre ein Alleinstellungsmerkmal für ModelCHECK, da die Software damit sowohl der ersten als auch der dritten Kategorie zugeordnet werden könnte.

3.3.2 Bauteilanalyse mit DFMPPro

Beim DFMPPro-Tool handelt es sich um eine Software der dritten Kategorie (vgl. Abschnitt 2.4.3). Im Gegensatz zu ModelCHECK ist die Kernfunktion von DFMPPro die automatisierte Geometrieüberprüfung hinsichtlich ihrer fertigungsgerechten Gestaltung, weswegen auch ohne Zweckentfremdung oder Neuprogrammierung von Prüfungen die Einhaltung einer Vielzahl von Gestaltungsrestriktionen sichergestellt werden kann. Hierzu werden die Geometriekomponenten mithilfe eigens zu diesem Zweck entwickelten Feature-Erkennungs-Engines¹⁰ detektiert und ihre Erzeugungsinformationen ausgelesen. Die Engines analysieren hierbei die Geometrie hinsichtlich des angegebenen Bearbeitungsverfahrens, um auf diese Weise bestimmte Geometriekomponenten einem Bearbeitungsschritt zuzuordnen und die entsprechenden Fertigungsparameter zu definieren. Diese Daten stehen für eine nachfolgende Prüfung in Form eines Soll-Ist-Abgleiches zur Verfügung.

¹⁰ Engines: In der Informationstechnologie wird unter einer Engine ein eigenständiger Teil eines Computerprogramms verstanden und ist oft für komplexe Berechnungen oder Simulationen zuständig.

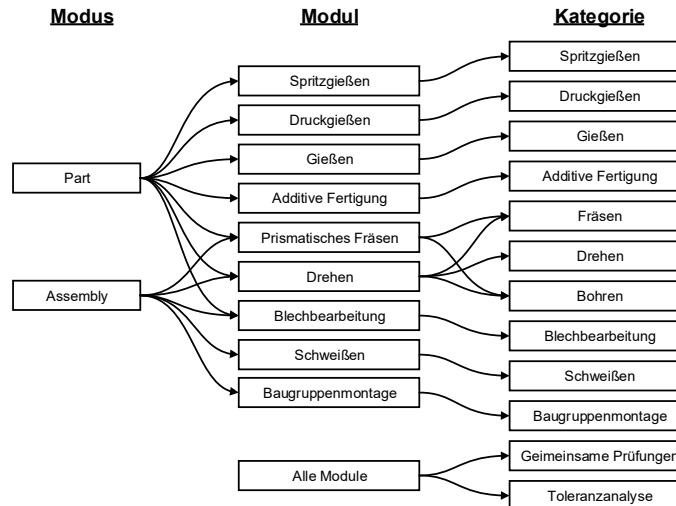


Abb. 3-23: Struktur des DFMPPro-Tools

DFMPPro beinhaltet eine Sammlung von vorinstallierten Prüfungen, die in verschiedene Kategorien unterteilt werden (vgl. Abb. 3-23). Es handelt es sich hier um die Prüfungen für die Sicherstellung der fertigungsgerechten Modellierung von Blechteilen, Druckgussteilen, Gussteilen und Spritzgussteilen sowie von Bauteilen, die spanend mit den Fertigungsverfahren Drehen, Fräsen oder Bohren hergestellt werden. Weiterhin bestehen die Regeln für die Gestaltung von geschweißten und additiv gefertigten Bauteilen und für den Zusammenbau von Baugruppen. Auch Toleranzen, welche unterhalb eines fertigungsverfahrensspezifischen Grenzwertes liegen und so unnötige Feinbearbeitungsschritte erfordern, können detektiert und angezeigt werden.

Der Einsatz von DFMPPro für die Überprüfung eines CAD-Modells innerhalb der CAD-Umgebung von Creo 2.0 ist am Beispiel eines Frästeils im Workflowdiagramm dargestellt (siehe Abb. 3-24).

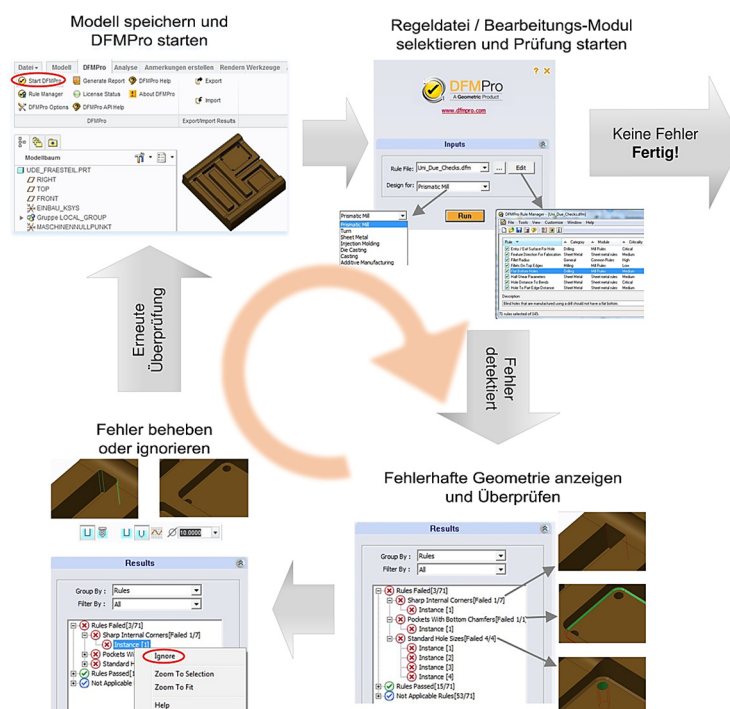


Abb. 3-24: Programmablaufplan bei DFMPPro

Im ersten Schritt wird für eine Modellüberprüfung die sog. Regeldatei (Rule File) ausgewählt. Innerhalb der Regeldatei sind alle Prüfungen angegeben, die bei einer Modellüberprüfung berücksichtigt werden sollen. Diese Regeldateien ermöglichen dem Anwender somit das Individualisieren des Prüfungsvorganges durch Definition von verschiedenen Prüfungskombinationen.

Die Besonderheit des DFMPPro-Tools ist die Programmierungsmöglichkeit eigener Prüfungen mithilfe der vordefinierten DFM-Engines und des Zugriffs auf ausgewählte Prüfungen. Diese Möglichkeit wird dem Anwender entweder basierend auf C++ in seiner bevorzugten Programmierumgebung oder in Visual Basic (VB) mithilfe einer VSTA-Schnittstelle (Visual Studio Tools for Applications) in einer VSTA-integrierten Entwicklungsumgebung (VSTA-IDE) gegeben. DFMPPro stellt auch eine eigene Programmierschnittstelle für alle CAD-Plattformen außer PTC Creo Parametric zur Verfügung, wodurch kein Wechsel in eine separate Umgebung notwendig ist.

Zur Untersuchung des Beispiels einer Getriebewelle und mit der Festlegung der konventionellen Fertigungsverfahren werden die programminternen Module und Prüfungen der Kategorie: „Drehen“, „Fräsen“, „Bohren“, „Gemeinsame Prüfungen“ und „Toleranzanalyse“ einbezogen (vgl. Abb. 3-23).

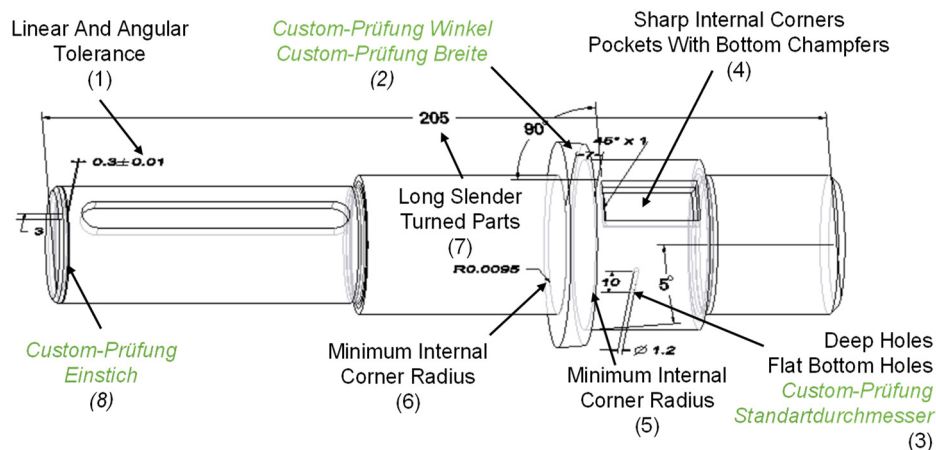


Abb. 3-25: DFMPPro-Prüfungen für ein 3D-Modell einer Getriebewelle

Bereits ein großer Teil der fehlerbehafteten Geometrie sollte durch die mitgelieferten Prüfungen von DFMPPro automatisiert detektiert und markiert werden können (vgl. Abb. 3-25). So bietet die Prüfung „Linear And Angular Tolerances“ die Möglichkeit, Toleranzfelder unterhalb eines anpassbaren Grenzwertes zu ermitteln, wodurch die zu enge Toleranz an der Position 1 angezeigt werden sollte.

Mithilfe der Prüfungen „Deep Holes“ und „Flat Bottom Chamfers“ der Kategorie „Bohren“ sollten sich sowohl das zu große Verhältnis von Bohrungslänge zu Bohrungsdurchmesser als auch der ebene Bohrgrund bei der Bohrung Position 3 aus dem Modell auslesen lassen.

Die nicht fertigungsgerechten, spitzen Kanten zwischen den Seitenwänden und die Fasen zwischen Seitenwand und Boden bei der gefrästen Passfedernut (Position 4) lassen sich mit den vorprogrammierten DFMPPro-Prüfungen „Sharp Internal Corners“ und „Pockets With Bottom Chamfers“ der Kategorie „Fräsen“ detektieren.

Weiterhin bietet die Prüfung „Minimum Internal Corner Radius“ der Kategorie „Drehen“ die Möglichkeit, Drehteile hinsichtlich zu kleiner Radien bei einer Verrundung von Innenkanten zu untersuchen. Sollte der Radius einer Innenkantenverrundung unterhalb eines benutzerdefinierbaren Grenzwertes liegen, wird eine Fehlermeldung ausgegeben. Auf diese Weise sollten u. a. der spitze Winkel an Position 5 (Radius=0 mm) und der kleine Radius an Position 6 (Radius=0,0095 mm) angezeigt werden.

Ein Grenzwert für das Verhältnis von Bauteillänge zu Bauteildurchmesser bei Drehteilen lässt sich mit der Prüfung „*Long Slender Turned Parts*“ festlegen. Bei Eingabe eines Maximalwertes unterhalb des tatsächlichen Verhältnisses (Position 7) sollte ein Hinweis auf die Notwendigkeit des Einsatzes von Reitstock und Lünette bei der drehenden Bauteilbearbeitung der Welle mithilfe von DFMPPro angezeigt werden.

Lösungsansätze für das Detektieren des langen, schmalen Einstiches (Position 8), der konischen, schmalen Spannfläche (Position 2) sowie des ungenormten Bohrungsdurchmessers (Position 3) lassen sich mithilfe der vorprogrammierten DFMPPro-Prüfungen nicht formulieren. Aus diesem Grund ist für die Lösung ein Konzept auf Basis von benutzerprogrammierten Prüfungen erforderlich. Hierzu müssen mithilfe der programminternen Engines die entsprechenden, einem Fertigungsschritt zugeordneten Geometrielemente ermittelt und die Erzeugungsinformationen ausgelesen werden.

Für die Untersuchung des Einstiches soll das Verhältnis von Einstichtiefe/Einstichbreite überprüft werden (vgl. Abb. 3-19). Für das Auslesen der Erzeugungsinformationen müssen das Fertigungsfeature des Einstiches ermittelt und die zugehörigen Erzeugungsinformationen ausgelesen werden. Im Anschluss folgt der Abgleich mit dem maximalen Verhältnis. Hierzu müssen, wie in Abb. 3-26 gezeigt, aus dem Feature Minimal- und Maximalwert für die Radien sowie der Minimalwert für die Breite ausgelesen werden. Daraufhin muss die Differenz aus kleinstem und größtem Radius gebildet und mit dem Quotienten aus Radiusdifferenz und kleinster Breite der Abgleich mit dem Sollwert durchgeführt werden.



Abb. 3-26: DFMPPro-Lösungsansatz zur Analyse der Einstichgeometrie

Für die Sicherstellung der Verwendung von Standarddurchmessern bei der Bohrungserzeugung müssen alle Fertigungsfeatures, die dem Fertigungsverfahren „Bohren“ zugeordnet werden, ermittelt und die dazugehörigen Durchmesser ausgelesen werden. Alle Bohrungen bzw. deren Durchmesser müssen daraufhin in einer Schleifenfunktion mit jedem zugelassenen Standarddurchmesser verglichen werden. Sobald eine Übereinstimmung gefunden wird, sollte die Prüfung für die Bohrung abgebrochen und mit der nächsten Bohrungsgeometrie fortgefahren werden. Wenn jedoch keine Übereinstimmung existiert, muss das entsprechende Element als fehlerhaft gekennzeichnet werden.

Für das Detektieren von ungeeigneten, kegeligen Spannflächen sowie von Spannflächen mit einer Breite von unter 10 mm wird nachfolgend vereinfacht festgelegt, dass eine Spannfläche der Absatz eines Drehteiles mit dem größten Durchmesser ist. Für einen Soll-Ist-Abgleich müssen der Winkel, bezogen auf die Drehachse, und die Breite des größten Absatzes ausgelesen werden.

Für das Bestehen der Prüfung muss der Wert des Winkels null Grad entsprechen und die Absatzbreite größer als 10 mm sein (vgl. Abb. 3-27). Auf diese Weise sollte mithilfe von DFMPPro bei Nichterfüllen der Sollwerte eine Fehlermeldung ausgegeben und der entsprechende Absatz markiert werden können.

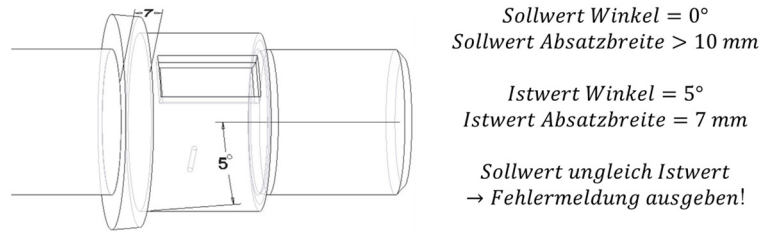


Abb. 3-27: DFMPro-Lösungsansatz zur Analyse der möglichen Spannstelle

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der Prüfungsumfang bezogen auf die konventionelle Fertigung zwar begrenzt ist, aber durch die Einbeziehung der Custom-Erweiterung zur Programmierung benutzerdefinierter Prüfungen erweiterbar ist und somit für die fertigungsorientierte Geometrieanalyse der 3D-CAD-Modelle am geeignetsten erscheint.

3.4 KBK-Methoden und die 3D-Produktmodellierung

Die Herstellzeit bildet einen wichtigen Faktor für die Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens, denn diese hat einen Einfluss auf die Herstellkosten. Somit bietet die Simulation der Herstellzeit und die Identifizierung des optimalen Kosten-Zeit-Verhältnisses einen wesentlichen Wettbewerbsvorteil.

Für eine realistische Kostenschätzung spielen weitere Faktoren wie die Art des Werkstoffs, Fertigungsgenauigkeiten, Oberflächenanforderungen oder Toleranzen eine wichtige Rolle. Da diese im CAD festgelegt werden, ist die Kosten- und Zeitabschätzung auf Basis der CAD-Modelle, ihrer Merkmale und enthaltenen Informationen der konsequente Schritt, um eine möglichst exaktes Ergebnis der Schätzung zu erlangen.

Bei der Betrachtung des methodischen Ansatzes zur Erreichung der Kostentransparenz in der Konstruktion durch konstruktionsbegleitende Kalkulationsmethoden (KBK-Methoden) fällt auf, dass dieser Ansatz in der Praxis nach wie vor nicht flächendeckend in Industrieunternehmen eingesetzt wird, obwohl die Notwendigkeit hierfür seit Längerem bekannt ist [Re01].

Das grundsätzliche Problem der qualitativen KBK-Methoden ist ihre begrenzte Eignung zur Beurteilung neuer, innovativen Lösungen. Es wird immer von einer bestehenden oder vergangenen Lösung ausgegangen und somit werden Rückschlüsse auf die neuen Anwendungen geschlossen. Dazu kommt, dass eine ausschließlich auf den quantitativen Hinweisen basierende Kalkulation nicht möglich ist [Mö11].

Als ein weiterer Grund kann die Anbindung der Methoden an die 3D-CAD-Systeme bzw. eine Kopplung mit dem 3D-CAD-Modell genannt werden. In dieser Hinsicht ist der Ansatz von REISCHL [Re01], welcher in dem Prototyp „extendiertes Kosteninformationssystem“ (XKIS) hervorzuheben. Die Grundlage für die Kostenzielverfolgung bilden dort die Methoden und Strategien zur Featurestrukturanalyse von 3D-Geometriemodellen und eine detaillierte Gliederung der von XKIS ermittelten Herstellkosten. Die Problematik bei der Anwendung dieser Strategie im Konstruktionsprozess ist die Tatsache, dass ein direkter Vergleich der Herstellkosten nur auf Basis ähnlicher Teile einer Teilefamilie sinnvoll ist und zu einer Identifizierung kostenintensiver Teile führen kann. Um die Gründe für die im Verhältnis zu anderen Teilen abweichenden Kosten zu finden, ist eine genauere Untersuchung notwendig, welche mit einem nicht geringen Aufwand verbunden ist. Es ist nicht nur ein Vergleich der Featurestrukturen der verschiedenen Teile notwendig, sondern es ist auch zu untersuchen, ob die Festlegung konkreter geometrischer oder technologischer Parameter eine unerwünschte Kostenzunahme verursacht [Re01].

Bisher werden Kostenbetrachtungen auf der Grundlage einer featurebasierten Fertigungsplanung vor allem in PPS-, ERP- und CAM-Systemen unterstützt. Die Fertigungsplanung ist zurzeit in der CAD-Umgebung nicht möglich, da erstens die allgemeine Modellierungsmethodik in der CAD-Umgebung nicht die realen Fertigungsschritte darstellt und zweitens der Modellierungsablauf nicht den Fertigungsablauf widerspiegelt. So können z. B. das Umspannen oder ein Werkzeugwechsel bei einer spanenden Fertigung, die einen signifikanten Anteil an den Herstellkosten haben, nicht in den bestehenden Ansätzen simuliert und untersucht werden. Zudem bauen die CAD-Modellierungsmethoden für das Erstellen eines Bauteils auf den Funktionen des Hinzufügens und Entfernens auf. Betrachtet man die spanende Fertigung, dann können die Features, die für die Hinzufüge-Funktionen erstellt werden, nicht für das Abbilden des realen Fertigungsprozesses verwendet werden. Somit fehlt es an einer fertigungsgerechten CAD-Modellierungsmethodik und an CAD-Funktionalitäten, die zielführend für die Kostenkalkulation ist. Eine mögliche Strategie zur Kopplung der KBK-Verfahren ist in der Abb. 3-28 dargestellt.

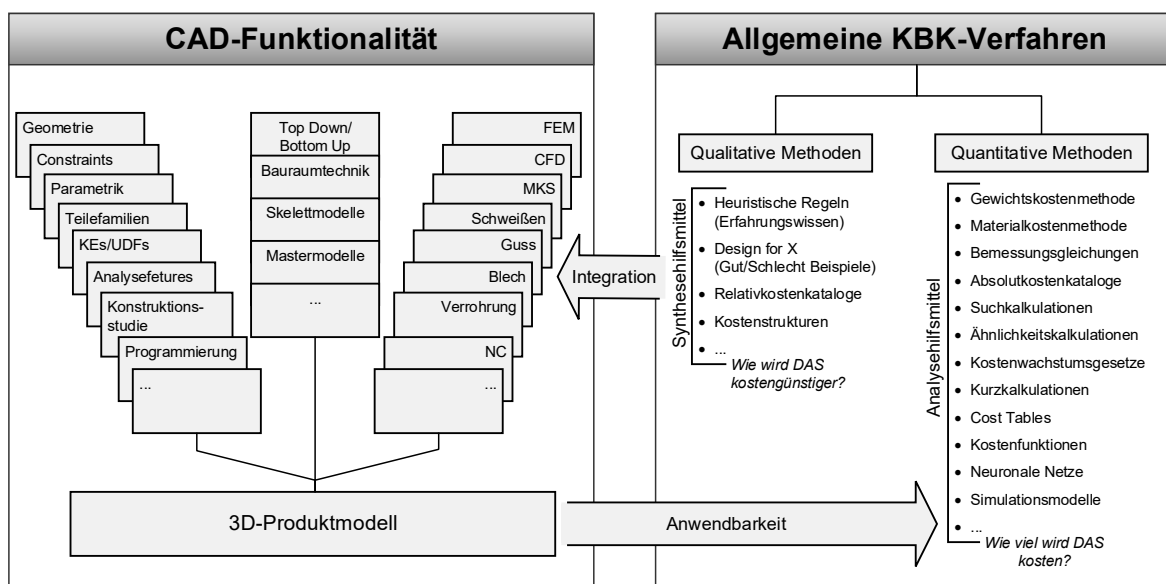


Abb. 3-28: Strategie zur Kopplung der KBK-Verfahren an den virtuellen Konstruktionsprozess

Das Ziel soll es sein, die qualitativen Methoden der verschiedenen KBK-Verfahren, welche als Synthesehilfsmittel während des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses herangezogen werden, in den 3D-Produktmodellierungsprozess mittels geeigneter CAD-Funktionalitäten zu integrieren und die spätere Anwendbarkeit der quantitativen Methoden auf das 3D-Produktmodell als Analysehilfsmittel zu unterstützen.

Nicht zuletzt sollte auch das Akzeptanzproblem auf die Veränderungen im Konstruktionsprozess angesprochen werden. Durch die Einführung eines Tools zur konstruktionsbegleitenden Kalkulation wird ein Eingriff in die vorhandenen Abläufe der Produktentwicklung vorgenommen. Damit sind Akzeptanzprobleme von vornherein wahrscheinlich [Re01]. Lösungen, die in CAD-Systeme integriert und den Entscheidungsprozess intuitiv unterstützen werden, würden mit großer Wahrscheinlichkeit zur Verringerung des Akzeptanzproblems führen. Zudem ist zum Zeitpunkt der CAD-Modellierung die Gestaltung des Produkts abgeschlossen und somit liegen genügend Informationen für eine exakte Kostenkalkulation vor. Auch zu diesem Zeitpunkt können Änderungen noch relativ kostengünstig realisiert werden.

3.5 Verfügbarkeit und Austausch der Daten, Informationen und des Wissens

Im Hinblick auf die Prozesskette Konstruktion-Fertigung und die Herstellkosten ist die Verfügbarkeit der Daten, Informationen und des Wissens während des Produktentwicklungs- und Konstruktionsprozesses vor allem mit der Fertigungsintegrationstiefe des Unternehmens eng verbunden. Bei einer relativ hohen Integrationstiefe der Fertigung ist der Zugriff auf die wichtigen, fertigungsrelevanten Daten, Informationen und Wissen für den Entwicklungsingenieur und Konstrukteur wesentlich einfacher, um auf dem aktuellsten Wissensstand zu bleiben. Jedoch betrifft im Zuge der Globalisierung und der ständigen Suche nach neuen kostengünstigeren Fertigungsmöglichkeiten das Thema Outsourcing oft in erster Linie die unternehmensinterne Fertigung. Die Kernkompetenzen solcher Unternehmen fokussieren sich dann auf die Entwicklung und Montage. Dabei kann es passieren, dass neben den versprechenden Herstellkosteneinsparungen das Expertenwissen durch die Versetzungen oder Entlassungen entsprechender Wissensträger verloren geht und gleichzeitig auch die Durchgängigkeit der Daten, Informationen und des Wissens in der Prozesskette Konstruktion-Fertigung unbewusst unterbrochen wird. Durch die evtl. fehlende Rückkopplung aus der Arbeitsvorbereitung, Fertigung oder Produktkalkulationsabteilungen kann den Entwicklungsingenieuren und Konstrukteuren das Sicherheitsgefühl hinsichtlich der fertigungsgerechten und kostenoptimalen Produktentwicklung verloren gehen. Im Extremfall könnte es sogar bedeuten, dass in der Zukunft der Entwicklungs- und Konstruktionsprozess und der Aufbau der 3D-Produktmodelle nur aus der Funktionssicht betrachtet werden. Infolgedessen ergäben sich hohe Kosten in der outgesourceten Fertigung, denn die Herstellbarkeit wäre dann nur durch aufwendige Fertigungsvorgänge realisierbar.

Aus den genannten Gründen ist es somit enorm wichtig, die Verfügbarkeit und Austauschbarkeit der Daten, Informationen und des Wissens zu gewährleisten. Dabei sollen nach HILEKE [Hi11] einige Aspekte im Blick behalten werden, um entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten zu können. Dazu gehören u. a.:

- Etablierung der Rückkopplung des Fertigers als eine wichtige Informationsquelle zur Vermeidung der Fehler,
- Integration des „Lead Engineer“-Konzeptes in die Unternehmensorganisation, um die Kompetenz und Erfahrung langjähriger Konstrukteure in Form eines Ansprechpartners und Beraters zur Lösung von Problemen direkt greifbar zu haben,
- Integration eines Cross-funktional-Konzeptes innerhalb der Projekte, um Entscheidungen im Team zu treffen und die multidisziplinäre Informationsverarbeitung zu unterstützen,
- Bereitstellung des Fertigungswissens und ein direkter Zugriff für die Entwicklung und Konstruktion. Dies soll nicht nur auf der organisatorischen Ebenen geschehen, welche in der Form einer Fertigungs- oder Konstruktionsberatung oder Schulungskonzeptes für verschiedene Fertigungstechnologien realisiert werden kann, sondern auch auf der IT-Ebene in der Form von konstruktionsbegleitenden Softwaretools und Applikationen.

Bei der Thematik der Verfügbarkeit und Austauschbarkeit der Daten, Informationen und des Wissens ist die Schnittstellenproblematik oft die anspruchsvollste und intensivste Aufgabe, die zu lösen gilt. Denn wenn auch zwischen verschiedenen Datenbeständen eine Verbindung besteht, sind die dazu notwendigen Schnittstellen in der Regel aufwendig zu warten und machen die aus den verschiedenen Softwarekomponenten bestehende Systemlandschaft sehr fehleranfällig. Schon beim kleinsten Versionsupdate einer Softwarekomponente kann eine Änderung einige Probleme bereiten. Die

heutzutage praktizierten Daten-Import/Export-Prozesse über die beteiligten Schnittstellen gewährleisten auch keine Sicherstellung einer Datenkonsistenz. Somit liegt es nahe zu vermuten, dass die Systemintegrität und die nahtlose Integration der Datenbestände über den gesamten Produktlebenszyklus eine wichtige Rolle für ein wirtschaftlich erfolgreiches Unternehmen auch in der Zukunft spielen werden, vor allem in den Bereichen des internationalen Wettbewerbs und der angestrebten Produktivitätssteigerung.

4 Wissensbasierte, norm- und fertigungsorientierte CAD-Methoden

4.1 Geometrie des Schraubfräsens und ihre Abbildung im CAD-System

Um den Einstieg in die Beschreibung und 3D-Modellierung der Werkzeugbewegungshüllen im CAD-System zu erleichtern, wird zuerst auf das Fertigungsszenario eingegangen, welches einen orthogonal zur Werkstückachse angestellten zylindrischen Schaftfräser mit runder Stirn (auch als Kugelfräser genannt) darstellt. Die mathematische Beschreibung dieses Szenarios ist, verglichen mit einem winklig angestellten, kegeligen Schaftfräser, weitaus weniger komplex und dient daher als Grundlage für die darauffolgenden Überlegungen. Zudem kann die Bewegungshülle eines zylindrischen Schaftfräfers mit runder Stirn im CAD-System durch eine geeignete Flächenmodellierungsmethodik abgebildet werden, sodass ein Vergleichsmodell zur Beurteilung der Validität und Genauigkeit der mathematischen Herleitung existiert. Dazu wird im Kugelmittelpunkt des Fräfers und entlang einer Leitkurve für den Werkzeugverfahrweg eine Regelfläche aufgespannt, welche die Bewegung der Werkzeugachse während der Vorschubbewegung darstellt. Ausgehend von dieser Fläche werden in beiden Richtungen die Versatzflächen mit einem Abstand entsprechend dem Fräserradius definiert und somit die Flankenflächen festgelegt (siehe Abb. 4-1).

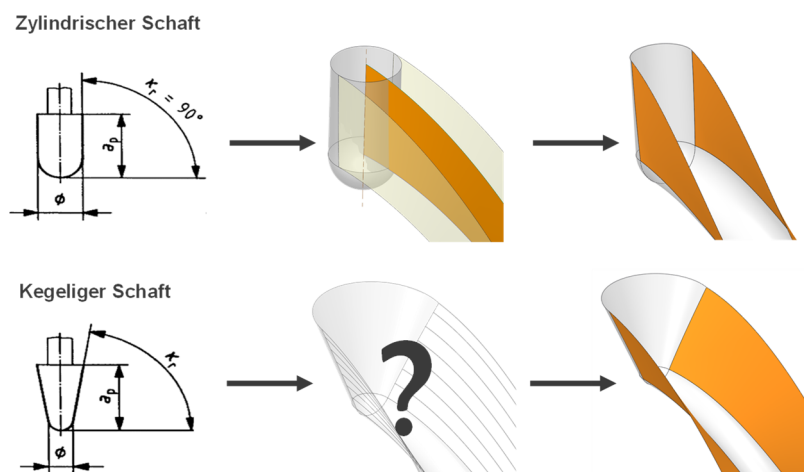


Abb. 4-1: Abbildung der Werkzeugbewegungshüllen

Die untere, halbkugelförmige Werkzeugstirn wird durch die Austragung eines Kreises mit dem Werkzeugradius (senkrecht zum Werkzeugverfahrweg) generiert. Die dabei entstehende Rohrfläche muss anschließend zur Hälfte getrimmt werden, sodass durch weitere Flächenoperationen die Werkzeugbewegungshülle für den zylindrischen Schaftfräser mit runder Stirn generiert werden kann.

Diese Vorgehensweise stützt sich auf die Verwendung von Versatzflächen für die Erzeugung der seitlichen Werkzeugberandungsflächen und ist aus diesem Grunde ausschließlich dem zylindrischen Schaftfräser vorbehalten. Für einen kegeligen Schaftfräser ist diese Methode nicht nutzbar, weswegen im Folgenden einige Strategien zur Beschreibung der Werkzeugwege und Gestaltung der Berandungsflächen diskutiert und vorgestellt werden.

4.1.1 Strategie zur Beschreibung der Werkzeugwege in CAD-Systemen

Für die Beschreibung der Werkzeugwege beim Schraubfräsen sind sowohl die Kenntnisse über eine räumliche Anordnung des Fräfers als auch des Werkstücks und der kinematischen Kette der Bearbeitungsmaschine von großer Bedeutung. Diese Bedingungen und Restriktionen beschreiben die

geometrische Ausprägung einer Werkzeugbewegungshülle, die sich durch den Schraubfräsvorgang während der Fertigung einer Wendel ergibt. Die Beschreibung der Werkzeugwege (auch Werkzeugverfahrwege genannt) und weiterer Werkzeugspurkurven kann in Abhängigkeit von den Auslegungsdaten durch verschiedene Ansätze erfolgen, wie z. B. durch analytische Geometriebeschreibungsmethoden oder mithilfe von Mehrkörpersimulationen bzw. Bewegungsstudien in den CAD-Systemen.

4.1.1.1 Analytische Beschreibung der Werkzeugwege

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der fertigungsorientierten Leitkurven besteht darin, die Kurven analytisch zu beschreiben und in Parameterform im CAD-System abzubilden. Betrachtet man den Werkzeugweg beim Schraubfräsvorgang aus der mathematischen Sicht, handelt es sich hier um eine Schraubenlinie an einem Zylinder. Die allgemeine Gleichung ist in der Abb. 4-2 (a) zu sehen. Sind die Auslegungsdaten für den Wendeltiefenverlauf in Form von Koordinatentupeln bereitgestellt oder lassen sie sich als mathematische oder grafische Funktion beschreiben, ist die Verknüpfung der Daten in die analytische Beschreibung einer 3D-Kurve relativ einfach zu implementieren (vgl. Abb. 4-2(b)). Zur Absicherung der räumlichen Eindeutigkeit für die spätere Beschreibung der Werkzeughüllflächen wird eine zweite 3D-Kurve benötigt, der das Werkzeug folgen soll. Wird die Fräserachse während der Fertigung stets senkrecht zur Werkstückachse angeordnet, muss der Radius der analytischen Kurvenbeschreibung der zweiten Fräserleitkurve um a vergrößert werden. Ist zusätzlich auch noch eine Schwenkung um den Winkel α gegenüber der Werkstückachse gewünscht, muss die Komponente b in der Beschreibung berücksichtigt werden (siehe Abb. 4-2 (c)).

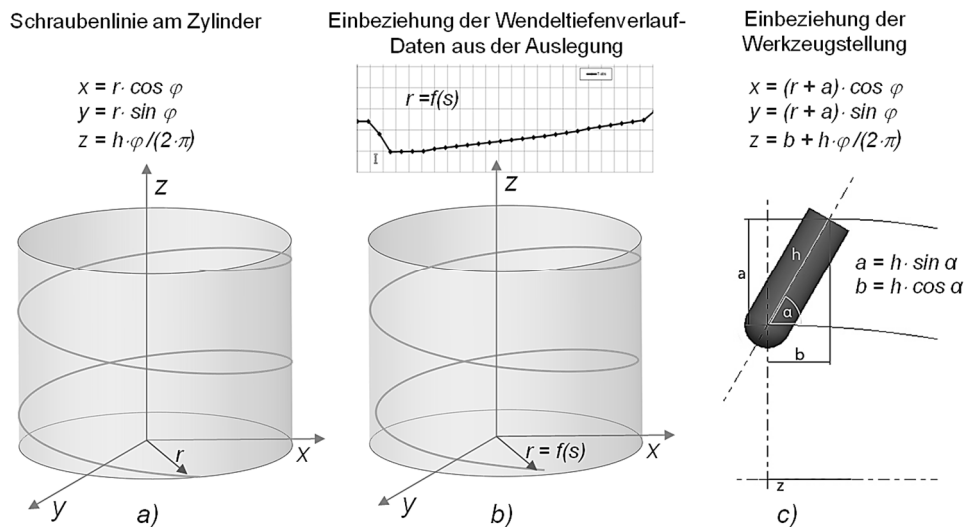


Abb. 4-2: Analytischer Ansatz zur Berechnung der Werkzeugverfahrwege

Die analytische Beschreibung im CAD-System kann durch eine Helixgleichung, wahlweise in kartesischen (Gleichung 4-1) oder zylindrischen (Gleichung 4-2) Koordinaten, erfolgen.

$$\begin{aligned} x &= r * \cos(o * c * t) \\ y &= r * \sin(o * c * t) \\ z &= d * t \end{aligned}$$

r : Radius der Helix
 c : Umschlingungswinkel [°]
 d : Windungslänge (z)

(Gleichung 4-1)

$$\begin{aligned} R &= r \\ \theta &= (o * c) * t \\ z &= d * t \end{aligned}$$

o : Orientierung (+1 := rechtssteigend)
 t : Laufvariable im CAD System (0 ... 1)

(Gleichung 4-2)

Unabhängig von der Methode zur Generierung des Verfahrensweges müssen während der Bauteilauseilung jene Punkte am Werkzeug definiert werden, welche die Werkzeugbahn während der Vorschubbewegung verfolgen. Sowohl bei der zylindrischen als auch der kegeligen Ausführung des Fräasers mit ebener Stirnfläche bietet es sich an, den besagten Punkt auf der Stirnfläche des Werkzeugs anzuordnen, während die Variante mit runder Stirn im Kugelmittelpunkt geführt wird.

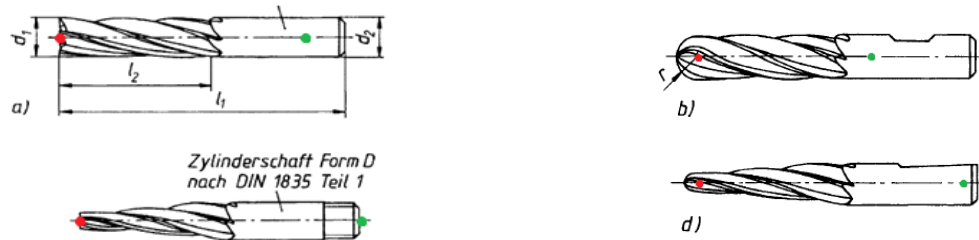


Abb. 4-3: Schaftfräser in kegeliger und zylindrischer Ausführung [PHL08]

In diesem Zusammenhang soll auch erwähnt werden, dass in den Reihen der VDI-Richtlinie [VDI4000] und [VDI4003] ein Konzept erbracht wird, welches den Aufbau von 3D-Modellen für die betrachteten Fräser behandelt. Da in dieser Arbeit die Werkstückgeometrie im Fokus steht, wird zugunsten der Übersicht auf eine exakte Werkzeugabbildung verzichtet, sodass die Werkzeugmodellierung in der Regel auf den schneidenden Teil beschränkt wird. Bei der Abbildung des gesamten Fertigungsprozesses, beispielsweise im Rahmen einer Mehrkörper- oder Fertigungs-simulation, wird sich die einheitliche Modellierung, trotz des größeren Aufwands, als vorteilhaft erweisen. Dies ist u. a. auf die einheitlich genormte Lage und Orientierung von Koordinatensystemen und Ebenen zurückzuführen, die den Austausch der Werkzeugmodelle stark vereinfachen können. Ein weiterer Vorteil ist bei Kollisionsbetrachtungen zu beobachten, die weitaus weniger zeitintensiv durchgeführt werden können, wenn die maßgeblichen Elemente des Werkzeuges (Störkontur) bereits vollständig vorhanden sind.

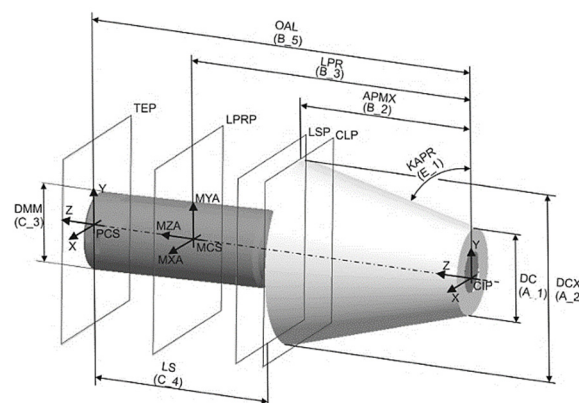


Abb. 4-4: Aufbau von Werkzeugmodellen nach [DIN4000-82]

4.1.1.2 Analytische Beschreibung der Werkzeugspurkurven

Als Werkzeugspurkurven werden die Kurvenscharen genannt, welche das Werkzeug zu beiden Seiten begrenzen und später zum Aufbau der Berandungsflächen dienen. Diese Kurven weisen die gleichen Helixparameter (Windungslänge und Umschlingungswinkel) wie der ursprüngliche Werkzeugverfahrweg auf. Dies führt dazu, dass die ursprüngliche Helix-Kurve im Raum an die richtigen Stellen versetzt werden muss. Dazu können zunächst weitere Leitkurven generiert werden, welche

sich auf der Werkzeugachse zwischen dem Werkzeugverfahrweg und der Fräserführung befinden, wobei mit steigender Anzahl die geforderte Genauigkeit erhöht werden kann. Anschließend werden innerhalb der Werkzeuggeometrie Kugeln definiert, welche ihren Kugelmittelpunkt auf den zuvor erzeugten Leitkurven haben und die Werkzeughülle tangieren (siehe Abb. 4-5).

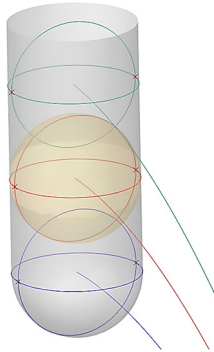


Abb. 4-5: Tangentialbedingung

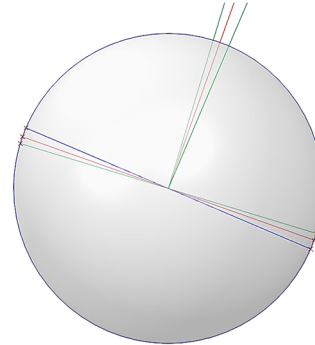


Abb. 4-6: Senkrechtensteuerung

Auf diese Weise können zwei Schnittkurven erzeugt werden. Die erste Kurve ergibt sich aus einem Schnitt zwischen Kugel- und Werkzeugmantelfläche (siehe Abb. 4-5) und die zweite Kurve durch einen Schnitt zwischen Kugelfläche und der Ebene (siehe Abb. 4-6), die senkrecht zu der jeweiligen Leitkurve ausgerichtet ist. Die Schnittpunkte dieser beiden Schnittkurven ergeben letztlich die gesuchten Versatzpunkte für die zu ermittelnden Berandungskurven. Während diese konstruktive Herangehensweise unabhängig von der Werkzeugform oder dem Anstellungswinkel des Werkzeugs gilt, müssen für ein analytisches Vorgehen mehrere Fälle unterschieden werden.

Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Radius der Helix-Kurve jeweils konstant ist und somit der Fall (a) aus der Abb. 4-2 betrachtet wird. Des Weiteren werden zunächst jene Parameter bzw. Stellgrößen für die Berandungskurven erläutert, die in allen Fällen konstant sind.

Mithilfe der Steigung m (Gleichung 4-3) lässt sich unmittelbar der Gangwinkel α (Gleichung 4-4) der Schraubenkurve ermitteln.

$$m = \frac{360^\circ * d}{c} \quad (\text{Gleichung 4-3})$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{m}{2 * \pi * r_n} \right) \quad (\text{Gleichung 4-4})$$

Der Radius r_n bezieht sich dabei auf die jeweilige Mittenkurve, die ihren Ursprung auf der Werkzeugachse im Mittelpunkt der tangierenden Kugel hat.

Gegenüber der zugehörigen Mittenkurve weist die Berandungskurve einen neuen Radius r_{neu} , einen Versatz w in Z-Richtung und einen Winkelversatz δ in der XY-Ebene auf. Da der Radius r_{Wz} des Werkzeugs und der Gangwinkel der Mittenkurve bekannt sind, kann der Versatz in Y- (v) und Z-Richtung (w) unmittelbar berechnet werden (siehe Abb. 4-7):

$$\begin{aligned} v &= \sin(\alpha) * r_{Wz} \\ w &= \cos(\alpha) * r_{Wz} \end{aligned} \quad (\text{Gleichung 4-5})$$

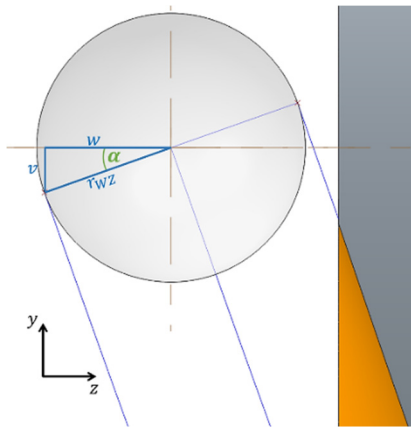


Abb. 4-7: Versatz (YZ)

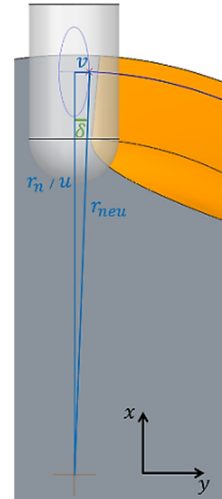


Abb. 4-8: Versatz (XY)

Der Versatz v zeigt sich in seiner wahren Länge sowohl in der YZ- als auch in der XY-Ebene, sodass sich der Versatzwinkel δ und der neue Radius r_{neu} entsprechend (Gleichung 4-6) und (Gleichung 4-7) berechnen.

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{v}{u} \right) \quad (\text{Gleichung 4-6})$$

$$r_{neu} = \frac{v}{\sin(\delta)} \quad (\text{Gleichung 4-7})$$

Durch die errechneten Größen kann nach (Gleichung 4-8) für beide Seiten jeweils eine Berandungskurve ($-\delta$ und $+\delta$ bzw. $+\delta$ und $-\delta$) bereitgestellt werden. Durch die inkrementelle Erhöhung des Radius r_n wird für beide Seiten der Werkzeughülle jeweils eine Kurvenschar erzeugt, durch die später wiederum die Berandungsfläche definiert werden kann.

$$\begin{aligned} r &= r_{neu} \\ \theta &= \mp \delta + (o * c) * t \\ z &= \pm w + d * t \end{aligned} \quad (\text{Gleichung 4-8})$$

Analog zu der zylindrischen Variante müssen bei einer kegligen Werkzeugform zunächst jene Versatzpunkte identifiziert werden, die im Anschluss als Startpunkt für die Berandungskurven fungieren. Im Gegensatz zum zylindrischen Schaftfräser ist insbesondere auffällig, dass der Startpunkt der Mittenkurve und die Startpunkte der beiden Berandungskurven nicht mehr in einer Ebene liegen, welche senkrecht zur Werkzeugachse ausgerichtet ist (vgl. Abb. 4-5). Zudem kann der Radius r_{WZ} des Werkzeugs nicht mehr als bekannte Größe herangezogen werden, da sich die entscheidende Größe entlang der Werkzeugachse stetig erhöht (vgl. r_{WZ} und r_{Kr} in Abb. 4-9).

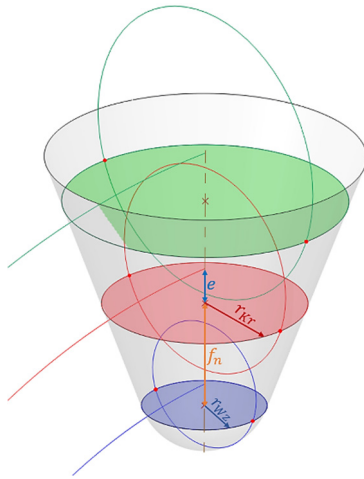


Abb. 4-9: Schnittkurven

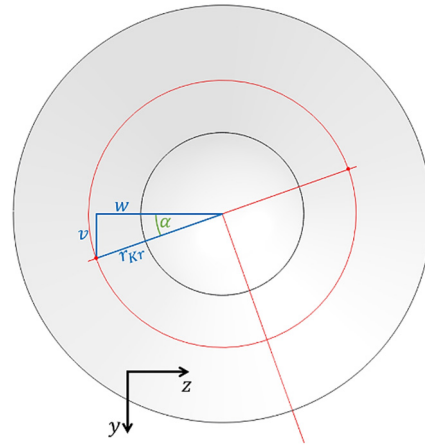


Abb. 4-10: Kegeliges Werkzeug (YZ)

Für die mathematische Beschreibung wird (im Vergleich zum zylindrischen Schaftfräser) zunächst der Werkzeugradius r_{Wz} durch den variablen Kreisradius r_{Kr} ersetzt, welcher von der Führungshöhe f abhängig ist. Diese Größe beschreibt den Abstand zwischen den Versatzkurven (entlang der Werkzeugachse) und ist somit maßgeblich für die geforderte Genauigkeit verantwortlich. Des Weiteren wird eine Nummerierung n für die Kurvenpaare eingeführt. Dabei stellt $n = 0$ die erste Kurve, also den eigentlichen Werkzeugverfahrweg dar, wo zudem $r_{Kr} = r_{Wz}$ gilt (siehe Abb. 4-9). Die Führungshöhe f wird stets von der ersten Kurve mit $n = 0$ bemessen, sodass sich f in Abhängigkeit von n nach (Gleichung 4-9) errechnet.

$$f_n = f * n \quad \text{mit } n = 0, 1, 2 \dots \quad (\text{Gleichung 4-9})$$

Der gesuchte Kreisradius r_{Kr} berechnet sich zu:

$$r_{Kr} = r_{Wz} + f_n * \tan(\gamma) \quad \text{mit } \gamma: \text{Öffnungswinkel des Werkzeugs} \quad (\text{Gleichung 4-10})$$

Dennoch muss weiterhin gelten, dass der Gangwinkel α jener Helix ausschlaggebend ist, die im Mittelpunkt der tangierenden Kugel beginnt (s. Markierung 3 in Abb.: 4-11). Der Radius dieser Helix wird in Abhängigkeit von n mit r_n bezeichnet und berechnet sich nach:

$$e = r_{Kr} * \tan(\gamma) \quad (\text{Gleichung 4-11})$$

$$r_n = r_v + f_n + e \quad (\text{Gleichung 4-12})$$

Die Versatzgrößen v und w ergeben sich analog zu der zylindrischen Variante entsprechend (Gleichung 4-13) während sich der Versatz u in X-Richtung jetzt nach (Gleichung 4-14) berechnet.

$$\begin{aligned} v &= \sin(\alpha) * r_{Kr} \\ w &= \cos(\alpha) * r_{Kr} \end{aligned} \quad (\text{Gleichung 4-13})$$

$$u = r_n - e = r_v + f_n \quad (\text{Gleichung 4-14})$$

Die übrige Herleitung für die Berandungskurve in Zylinderkoordinaten unterscheidet sich nicht von der zylindrischen Variante und erfolgt daher nach (Gleichung 4-6) bis (Gleichung 4-8).

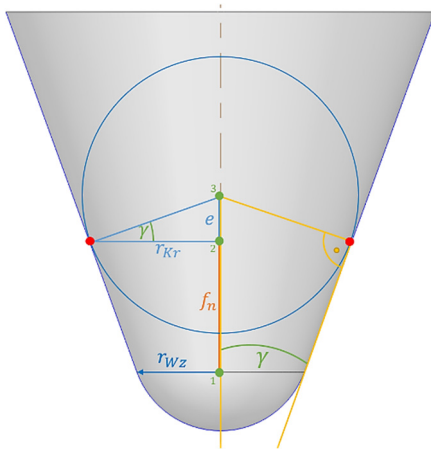


Abb.: 4-11: Parameter am konischen Schaftfräser

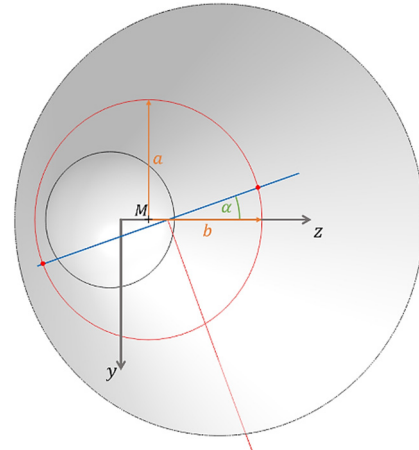


Abb. 4-12: Werkzeugneigung (YZ)

Ist eine winklige Anstellung des Fräasers gefordert, ergeben sich für die Berechnung der Berandungskurven einige Besonderheiten. Zudem wird an dieser Stelle eine Herleitung erbracht, die unabhängig von der Werkzeugausführung und -anstellung gilt. Durch die Neigung des Werkzeugs kann für die Berechnung der Versätze v und w in der YZ-Ebene weder der Parameter r_{Wz} (siehe Abb. 4-7) noch der Parameter r_{Kr} (siehe Abb. 4-10) herangezogen werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich der Kreis mit dem Radius r_{Kr} durch die Neigung des Werkzeugs in der YZ-Ebene als Ellipse darstellt (siehe Abb. 4-12). Um die (rot markierten) Versatzpunkte zu ermitteln, werden im Folgenden eine Geraden- sowie eine Ellipsengleichung aufgestellt. Die Schnittpunkte dieser beiden Elemente ergeben schließlich die gesuchten Versatzpunkte.

$$z = m * y + n$$

mit m : Steigung der Geraden (Gleichung 4-15)
mit n : z – Achsenabschnitt der Geraden

$$\frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad \text{(Gleichung 4-16)}$$

Die Steigung m der Geradengleichung entspricht dem Gangwinkel α der Helix mit dem Radius r_n , sodass gilt:

$$m = \tan(90 + \alpha) \quad \text{(Gleichung 4-17)}$$

Der Z-Achsenabschnitt n der Geraden ist vom Neigungswinkel des Werkzeugs abhängig und berechnet sich, bezogen auf den Mittelpunkt der Ellipse, nach:

$$n = e * \cos(\beta) \quad \text{(Gleichung 4-18)}$$

Für die Ellipse entspricht der Parameter a unverändert dem Radius r_{Kr} . Der Parameter b ist jedoch erneut von dem Neigungswinkel β des Werkzeugs abhängig und entspricht daher:

$$b = r_{Kr} * \sin(\beta) \quad \text{(Gleichung 4-19)}$$

Da alle Variablen bestimmt sind, kann der Schnittpunkt der beiden Geometrien durch das Einsetzen der Geradengleichung in die Ellipsengleichung berechnet werden. Aufgrund der Tatsache, dass es sich um zwei gesuchte Schnittpunkte handelt, entsteht infolgedessen eine quadratische Gleichung, sodass die beiden Versätze in Y-Richtung unmittelbar mit der Hilfe der pq -Formel ermittelt werden können:

$$v = y_{1,2} = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\left(-\frac{p}{2}\right)^2 - q} \quad (\text{Gleichung 4-20})$$

Die Parameter p und q lauten dabei:

$$p = \frac{2 * r_{Kr}^2 * \tan(90 + \alpha) * \tan(\gamma) * \cos(\beta)}{\sin(\beta)^2 + \tan(90 + \alpha)^2} \quad (\text{Gleichung 4-21})$$

$$q = \frac{r_{Kr}^2 * (\tan(\gamma)^2 * \cos(\beta)^2 - \sin(\beta)^2)}{\sin(\beta)^2 + \tan(90 + \alpha)^2} \quad (\text{Gleichung 4-22})$$

Der Versatz w in Z- sowie der Versatz u in X-Richtung ergeben sich mithilfe von v zu:

$$w = f_n * \cos(\beta) + e * \cos(\beta) + v * \tan(90 + \alpha) \quad (\text{Gleichung 4-23})$$

$$u = (r_v + f_n * \sin(\beta)) + \frac{|w| + f_n * \cos(\beta)}{\tan(\beta)} \quad (\text{Gleichung 4-24})$$

Die übrigen Helixparameter sind unverändert, sodass weiterhin die Helix in Zylinderkoordinaten entsprechend (Gleichung 4-8) gilt.

Um die Allgemeingültigkeit dieser Herleitung zu prüfen, werden im Folgenden die Parameter so gewählt, dass es sich um eine senkrechte ($\beta = 90^\circ$) Anstellung des zylindrischen ($\gamma = 0^\circ$) Schaftfräasers handelt. Da bekanntlich $\sin(90^\circ) = 1$ und $\tan(0^\circ) = 0$ ist, ergeben sich für die beschriebene Herleitung folgende Besonderheiten:

$$b = r_{Kr} * \sin(90^\circ) = r_{Kr} \quad (\text{Gleichung 4-25})$$

$$a = b = r_{Kr}$$

$$\frac{y^2}{r_{Kr}^2} + \frac{z^2}{r_{Kr}^2} = 1 \Leftrightarrow y^2 + z^2 = r_{Kr}^2 \quad (\text{Gleichung 4-26})$$

Die orthogonale Anstellung des Fräasers führt also dazu, dass die Ellipsengleichung zu einer Kreisgleichung mit dem Radius r_{Kr} wird. Für die zylindrische Ausführung des Werkzeugs gilt zudem:

$$r_{Kr} = r_{Wz} + f_n * \tan(0^\circ) = r_{Wz} \quad (\text{Gleichung 4-27})$$

Auf diese Weise wird der Zustand, der u. a. in Abb. 4-7 vorzufinden ist, wiederhergestellt und die Gültigkeit ist für alle Neigungswinkel β sowie Öffnungswinkel γ zwischen 0° und 90° erwiesen.

4.1.1.3 Kinematischer Ansatz zur Bestimmung der Werkzeugwege

Eine andere Möglichkeit, die Werkzeugverfahrwege ohne mathematische Umrechnungen direkt generieren zu können, ist die Nutzung der sog. Spurkurven aus der Mehrkörpersimulation. Dabei handelt es sich um 3D-Kurven, die von den CAD-Systemen anhand von werkzeugcharakteristischen Punkten auf den Werkzeugoberflächen als Simulationsergebnis automatisch generiert werden können (vgl. Abb. 4-13). Die Schwierigkeit bei diesem Ansatz besteht in der Bestimmung und Abbildung der reellen Maschinenkinematik mithilfe von virtuellen Gelenken, da diese idealisierten Verbindungen nicht unbedingt den realen Gelenken entsprechen. Ein weiterer entscheidender Aspekt zur Nutzung der Methodik ist die Vergabe der werkzeugcharakteristischen Punkte und die Einbeziehung der Auslegungsdaten in die Simulation. Für das Beispiel des Wendelverteilers und des zylindrischen Schaftfräasers mit runder Stirn werden die Punkte im Kugelmittelpunkt des Fräasers und auf der Werkzeugachse definiert. Durch die Festlegung eines Verlaufsprofils zur Höhensteuerung des Werkzeugs bzw. des Tisches in Form einer 2D-Kurve, welche dem Wendeltiefenverlauf aus der Auslegung entspricht, können die reellen Werkzeugwege nach dem Simulationsablauf automatisch generiert werden. Diese werden gleichzeitig auch als Geometrieschnitte zur Gestaltung von erwähnten Werkzeugbewegungshüllen verwendet.

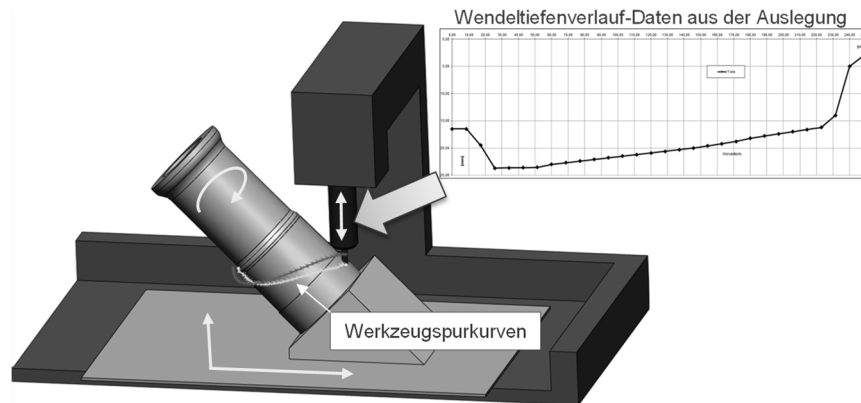


Abb. 4-13: Virtuelle Werkzeugmaschine

Der Vorteil dieser Methode ist ihre Eignung zur Verifizierung der Richtigkeit und Machbarkeit der berechneten Werkzeugverfahrwege auf einer virtuellen Fräsmaschine. Die Voraussetzung dafür ist die Abbildung der realen Fertigungsbedingungen in der virtuellen Welt in Form einer Bewegungsbaugruppe oder eines Motion-Skelettes. Mit dieser Vorgehensweise ist jedoch die Generierung der seitlichen Werkzeugspurkurven, welche letztlich die Berandungsflächen bilden sollen, etwas problematisch. Der Grund dafür ist die Schwierigkeit der Lagebestimmung der Punkte auf der Werkzeugoberfläche, welche während der Simulation die realen seitlichen Werkzeugspurkurvenscharen bilden.

4.1.2 Gestaltung der Bewegungshüllflächen im CAD-System

Die Gestaltung einer Werkzeugbewegungshülle besteht aus mehreren flächenbasierten Modellierungsschritten. Es wird somit zwischen der Modellierung der seitlichen Werkzeugberandungsflächen, des Eingriffs der Werkzeugstirnfläche (kugelförmige oder ebene Bodenflächen) und des Werkzeugauslaufs differenziert.

4.1.2.1 Werkzeugberandungsfläche

Zum Aufbau der beiden seitlichen Berandungsflächen der Werkzeugbewegungshülle werden die analytisch ermittelten Werkzeugspurkurvenscharen verwendet, welche vorerst um weitere Querkurven (Kurvenschar in zweite Richtung) ergänzt werden. Dazu ist es notwendig, auf jeder Kurve der Kurvenschar mehrere Punkte zu definieren, welche im Verhältnis zueinander gleichmäßig auf den Kurven verteilt werden (siehe Abb. 4-14). Anschließend wird je eine Kurve durch jede Punkteschar sowie durch die beiden Kurvenenden definiert.

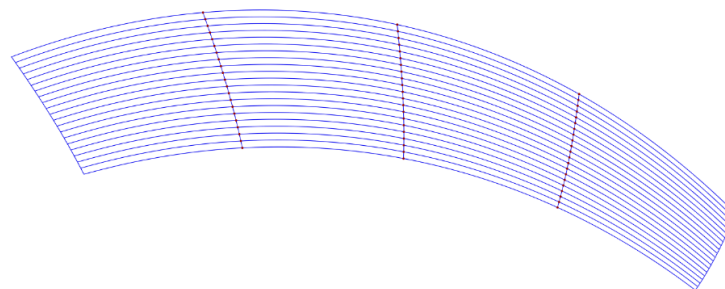


Abb. 4-14: Gitterstruktur zur Gestaltung der seitlichen Berandungsflächen

Die gesuchte seitliche Werkzeugberandungsfläche wird zwischen den generierten Kurvenscharen in erster und zweiter Richtung aufgespannt.

4.1.2.2 Werkzeugbodenfläche

Die Gestaltung des Eingriffs der Werkzeugstirnfläche (kugelförmige oder ebene Bodenflächen) ist im Vergleich zu den Berandungsflächen etwas komplexer. Betrachtet man zuerst die Bewegungshülle eines zylindrischen Schaftfräasers mit runder Stirn, ist die Abbildung des kugelförmigen Werkzeugbodens verhältnismäßig unproblematisch zu realisieren (vgl. Abb. 4-1). Für den kegeligen Schaftfräser ergibt sich die Besonderheit, dass der Kugelmittelpunkt nicht mehr mit dem Werkzeugverfahrweg zusammenfällt, sodass für die Austragung des Kreises, welcher die konische Werkzeugmantelfläche tangiert, eine neue Leitkurve hergeleitet werden muss (siehe Abb.: 4-11 sowie Abb. 4-15).

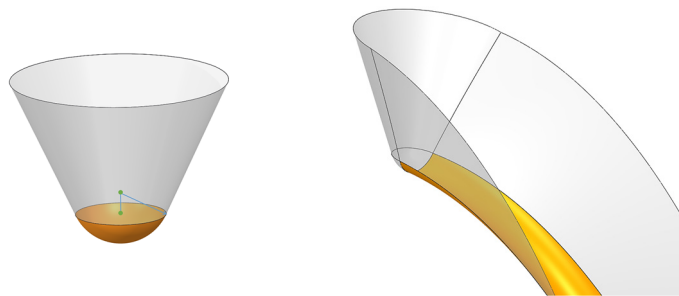


Abb. 4-15: Bodenfläche eines konischen Schaftfräasers

Zudem ändert sich der Radius des auszutragenden Kreises zu:

$$r_{ab} = r_{Wz} * \sqrt{1 + \tan^2(\gamma)} \quad (\text{Gleichung 4-28})$$

Werkzeuge mit einer ebenen Bodenfläche weisen eine weitaus höhere Komplexität hinsichtlich der Beschreibung und Modellierung der Bodenfläche der Nut auf. Auch wenn eine Unterscheidung zwischen zylindrischer und konischer Ausführung des Werkzeugs entfällt, muss im Gegenzug zwischen einer orthogonalen und einer winkligen Anstellung des Werkzeugs differenziert werden. Bei einer rechtwinkligen Anstellung des Werkzeugs gegenüber dem Werkstück zeigen sich in der Bodenfläche der Kanengeometrie verschiedene Flächenanteile, die in Abhängigkeit von den verschiedenen Helixparametern variieren.

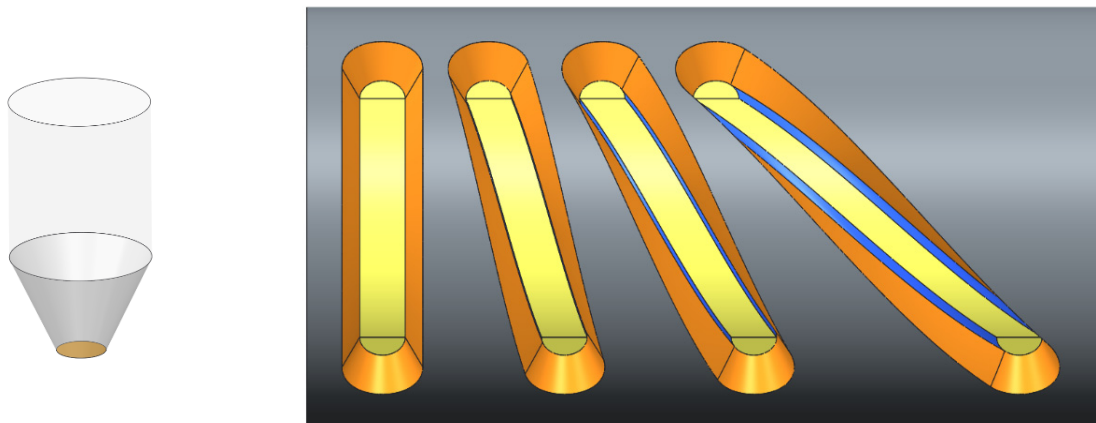


Abb. 4-16: Flächenanteile in Abhängigkeit vom Gangwinkel

In Abb. 4-16 ist dargestellt, wie sich die verschiedenen Flächenanteile bei einer stetigen Erhöhung der Steigung bzw. des Gangwinkels der Helix verändern. Dies wird erreicht, indem der Umschlingungswinkel c konstant (90°) gehalten wird, während die Windungslänge d stets verdoppelt wird. Die erste Materialentfernung nutzt als Leitkurve für den Verfahrensweg einen ebenen Viertelkreis. Dies führt dazu, dass die Leitkurve eine Steigung von $m = 0$ aufweist und die Bodenfläche aus nur einem Flächenbereich besteht, welcher stets parallel zur Werkstückachse verläuft. Dieser achsparallele Bereich zeigt sich in dieser Form auch in allen anderen dargestellten Materialentfernungen. Die Gaußsche Krümmung dieser Fläche ist null und die Breite entspricht dem Werkzeugdurchmesser r_{wz} . Das bedeutet, dass die Fläche generiert werden kann, indem eine Gerade mit der Länge des Werkzeugdurchmessers r_{wz} senkrecht zur Projektion der Leitkurve in Z-Richtung ausgetragen wird.

Für alle Materialentfernungen mit einer Steigung von $m > 0$ handelt es sich um eine dreidimensionale Leitkurve und somit um auch um einen dreidimensionalen Werkzeugeingriff (siehe Abb. 4-17).

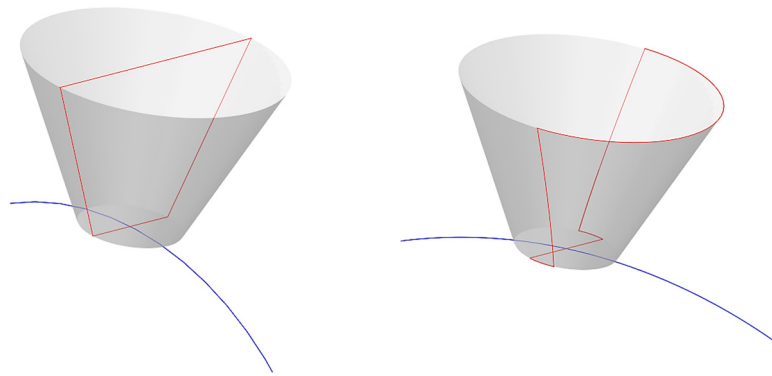


Abb. 4-17: Vergleich zwischen 2- und 3-dimensionalem Werkzeugeingriff

Mit steigendem Gangwinkel α prägt sich zunehmend ein weiterer Flächenanteil (blau dargestellt) aus, welcher auf den räumlichen Eingriff des Werkzeugs zurückzuführen ist (siehe Abb. 4-18). Durch die Bewegung des Werkzeugs entlang der dreidimensionalen Leitkurve bildet sich aus den Teilkreisen mit dem Radius r_{wz} eine gewölbte Fläche. Anhand der Kontur des Materialschnitts im Achsschnitt (siehe Abb. 4-19) lassen sich der achsparallele Anteil (gelb) und der gewölbte Anteil (blau) deutlich unterscheiden.

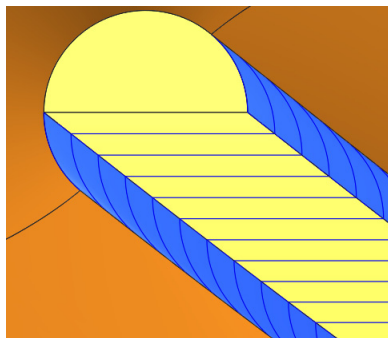


Abb. 4-18: Eingriffskurven



Abb. 4-19: Kontur im Achsschnitt

Für eine winklige Anstellung des Werkzeugs ergeben sich gegenüber der orthogonalen Anstellung erneut einige Besonderheiten. Während der Werkzeugverfahrweg bei der orthogonalen Anstellung immer vollständig innerhalb der achsparallelen Fläche (gelb) lag, führt die winklige Anstellung des Werkzeugs dazu, dass dieser Flächenbereich, welcher nicht mehr achsparallel, sondern um den Winkel β geneigt ist, unterhalb des Verfahrenswegs verläuft. Dieser Umstand ist bei der Auslegung des

Werkstücks zu beachten und gegebenenfalls auszugleichen. Des Weiteren sind die beiden gewölbten Flächenanteile (blau) nicht mehr gleich groß und symmetrisch gegenüber dem Verfahrensweg angeordnet (siehe Abb. 4-16), sondern variieren in Abhängigkeit von den Helixparametern und dem Anstellungswinkel β (siehe Abb. 4-20).

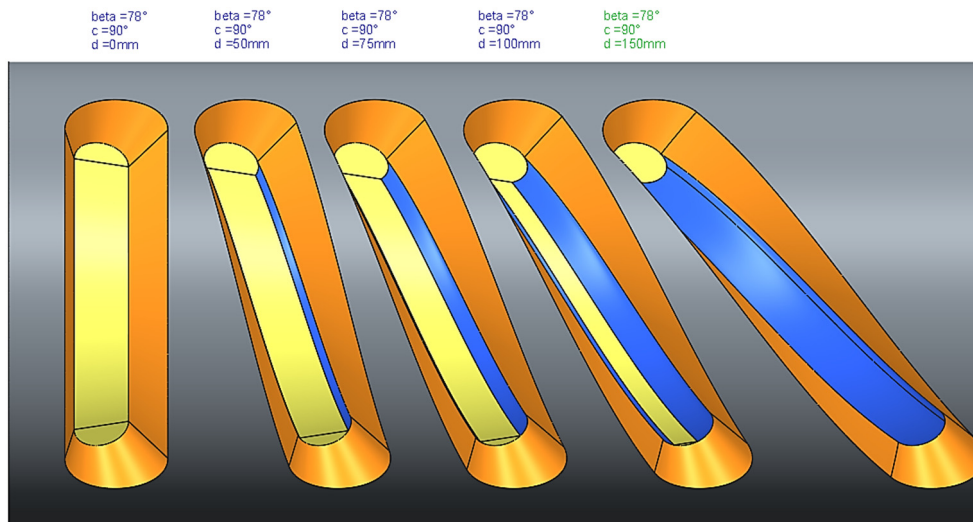


Abb. 4-20: Flächenanteile in Abhängigkeit vom Gangwinkel

Dies ist darauf zurückzuführen, dass der (zuvor achsparallele) abwickelbare Flächenanteil nun nicht mehr die exakte Breite des Werkzeugdurchmessers aufweist. Dies wiederum führt dazu, dass es sich am Verfahrensweg anfang und -ende nicht mehr um exakte Halbkreisflächen (s. Abb. 4-16) handelt, sondern um verschieden große Anteile einer Kreisfläche (s. Abb. 4-20). Um die Materialentfernung für ein winklig angestelltes Werkzeug zu beschreiben, müssen zunächst jene Kurven (s. rote Kurven in Abb. 4-21) ermittelt werden, die den abwickelbaren Flächenbereich begrenzen.

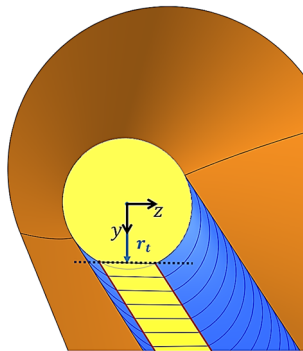


Abb. 4-21: Kreisflächenanteil

Die Helixparameter c, d und β entsprechen auch an dieser Stelle wieder dem ursprünglichen Verfahrensweg, sodass die versetzten Startpunkte ermittelt werden müssen, indem eine Ellipse mit einer Geraden (gepunktete Linie) geschnitten wird. Die Ellipse ist durch (Gleichung 4-29) gegeben, während die Gerade durch (Gleichung 4-30) abgebildet wird.

$$\frac{y^2}{r_{wz}^2} + \frac{z^2}{(r_{wz} * \sin(\beta))^2} = 1 \quad (\text{Gleichung 4-29})$$

$$y = v = r_t \quad (\text{Gleichung 4-30})$$

Der in Abb. 4-21 markierte Abstand r_t ergibt sich durch folgenden Zusammenhang:

$$r_t = d * \frac{360^\circ}{c} * \frac{\tan(90^\circ - \beta)}{2\pi} \quad (\text{Gleichung 4-31})$$

Der Versatz v in Y-Richtung ist somit bekannt. Für den Versatz w in Z-Richtung wird die Geradengleichung in die Ellipsengleichung eingesetzt (Gleichung 4-32). Der Versatz u in X-Richtung kann somit durch (Gleichung 4-33) berechnet werden.

$$w_{1/2} = \sqrt{1 - \frac{r_t^2}{r_{wz}^2} * \sin(\beta)} \quad (\text{Gleichung 4-32})$$

$$u_{1/2} = r_v \pm w_{1/2} * \tan(90^\circ - \beta) \quad (\text{Gleichung 4-33})$$

Auch an dieser Stelle kann für die Berechnung der übrigen Helixparameter (Gleichung 4-6) bis (Gleichung 4-8) herangezogen werden. Wird die rechte Nut in Abb. 4-20 betrachtet, fällt auf, dass der abwickelbare Anteil gänzlich dem gewölbten Flächenanteil gewichen ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Kreisflächen der Stirnfläche nicht mehr gegenseitig schneiden, sobald $r_t > r_{wz}$ gilt (siehe Abb. 4-21). In diesem Fall wird der gewölbte Anteil nicht mehr durch das Aneinanderreihen von zwei Teilkreissegmenten erreicht, sondern indem ein vollständiger Kurvenzug in Form eines Halbkreises genutzt wird. Auch hier gilt es zu beachten, dass der Werkzeugverfahrweg von der Materialentfernung unterschritten wird.

4.1.2.3 Werkzeugauslauf

Damit die generierte Werkzeugbewegungshülle für die Materialentfernung genutzt werden kann, muss diese aus einem vollständig geschlossenem Flächenverbund bestehen. Hierzu muss die Werkzeuggeometrie auf beiden Seiten modelliert werden und mithilfe der bereits existierenden Referenzen getrimmt werden (siehe Abb. 4-22).

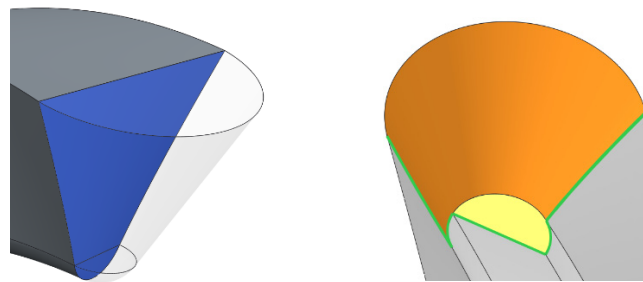


Abb. 4-22: Werkzeugabschlussflächen

Durch die Kombination weiterer Modellierungsoperationen wie z. B. Schneiden, Trimmen und Verschmelzen werden die einzelnen Flächen zu einem geschlossenen Flächenverbund, lassen sich somit zerspannungskonforme Features für unterschiedliche Werkzeuggeometrie aufbauen.

4.1.3 Beurteilung und Anwendbarkeit

Die vorangegangenen Ausführungen machen deutlich, dass viele der Flächen, die der Werkzeugbewegungshülle zugrunde liegen, durch eine Vielzahl von Kurven gebildet werden müssen, um eine ausreichende Genauigkeit und Stabilität zu erreichen. Dies wirft die Frage auf, wie viele Kurven letztlich für die verschiedenen Flächen benötigt werden und wie diese möglichst unkompliziert generiert

werden können. Generell sollte die Anzahl der verwendeten Konstruktionselemente möglichst gering gehalten werden, da andernfalls die Modellperformance sinkt, während die Dateigröße steigt. Letztlich ist die Anzahl der zu verwendenden Kurven von den eigenen Anforderungen an die Modellgenauigkeit und Modellperformance sowie den Bauteilabmaßen abhängig. In der nachstehenden Abb. 4-23 soll der Einfluss der Kurvenanzahl verdeutlicht werden, indem die im Eingriff stehende Werkzeugfläche mit der konstruierten Werkzeugbewegungshülle geschnitten wird.

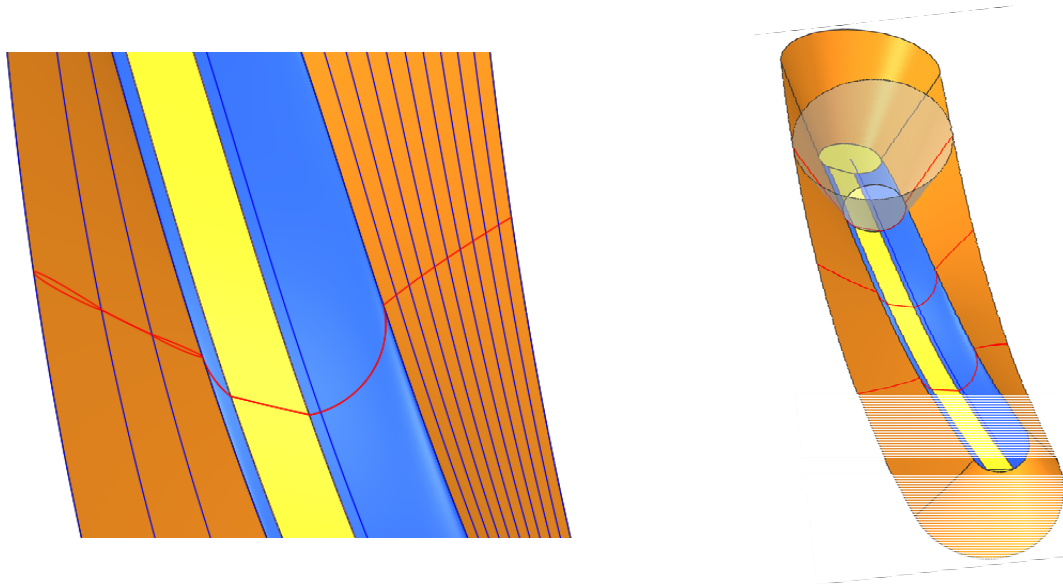


Abb. 4-23: Einfluss der Kurvenanzahl

Dabei ist deutlich zu erkennen, wie sich eine Reduzierung der Kurvenanzahl auf die Genauigkeit der resultierenden Fläche auswirkt. Während eine Schnittkurve zwischen Werkzeug und Werkzeugbewegungshülle für die rechte seitliche Berandungsfläche (zehn Kurven) eine ideale tangentielle Kante produziert, entsteht für die linke Berandungsfläche (vier Kurven) eine unregelmäßige Kurve, die darauf hindeutet, dass das Werkzeug die Berandungsfläche mehrfach schneidet.

Um die Anwendbarkeit der vorgestellten Modellierungsmethodik zu gewährleisten, ist eine entsprechende Bereitstellung für den Konstruktionsprozess mithilfe von CAD-Systemen vonnöten. Hierzu bietet sich vor allem der Einsatz von UDFs an. Somit können die einzelnen Modellierungsschritte zur Generierung von zerspanungsgerechten Werkzeugbewegungshüllen zusammengefasst und in Form eines digitalen Kataloges für zukünftige Anwendungen bereitgestellt werden. Darüber hinaus bietet sich hier auch die Einbindung fertigungsrelevanter Informationen über einzusetzende Werkzeuge und Maschinenparameter für die nachfolgenden CAM-Prozesse an.

Abschließend ist festzuhalten, dass die genauen Kenntnisse über die Fertigungsart des zu konstruierenden Bauteils eine der wichtigsten Voraussetzungen für die Nutzung der Modellierungsstrategie zur Abbildung der Werkzeugbewegungshüllen ist. Mit diesem Wissen können die realen Fertigungsbedingungen in die virtuelle Welt überführt werden, sodass vor der eigentlichen Bauteilkonstruktion zunächst die genauen Werkzeugwege analysiert und im CAD-System abgebildet werden. Diese Werkzeugwege können nicht nur als Geometrieschnittstelle zur automatisierten Generierung der Werkzeugbewegungshülle über den UDF-Ansatz verwendet werden, sondern auch als Werkzeugbahnen im CAM-System für die NC-Programmierung. Durch den Einsatz der vorgestellten Methoden wird sichergestellt, dass die virtuelle Geometrie des Bauteils mit der realen Geometrie aus dem spannenden Fertigungsverfahren exakt (im Rahmen zulässiger Toleranzen) übereinstimmt.

4.2 Normgerechte und fertigungsorientierte Features

4.2.1.1 Featureabhängigkeiten und Entscheidungshilfen

Aufgrund der zugrunde liegenden DIN-Normen für die Betrachtung der zu entwickelnden Features lassen sich daraus bereits sowohl eine gewisse Struktur zur Verwaltung der UDFs als auch deren inhaltliche Abhängigkeiten ableiten. Dazu gehört beispielsweise die Normverknüpfung.

Betrachtet man die Abhängigkeiten zwischen den Norm-Features, so greift beispielsweise formbedingt u. a. die DIN-Norm [DIN1448] für Kegelige Wellenenden mit Außengewinde auf Inhalte der DIN-Norm [DIN76] für Gewindefreistriche und die DIN-Norm [DIN6885] für Passfedern und Passfedernuten zurück. Weitere Beispiele liefern die DIN-Normen [DIN1449] für kegelige Wellenenden mit Innengewinde und die Reihe der DIN-Norm [DIN332] für die Zentrierbohrungen ([DIN332-1], [DIN332-2], [DIN332-7] [DIN332-8]). Die Erfassung der Abhängigkeiten zwischen den Features und den Parametern in einer Liste vereinfacht die Entwicklung einer geeigneten Strategie zur Verknüpfung der einzelnen Featureparameter sowohl während der Featurekonzeptionierung und der Gestaltung späterer Datenbankabfragen als auch der Dokumentation als Hilfestellung für den Benutzer.

	A	B	C	D	E	F	G	
1	Parameter							
2								
3	ParameterID	Norm/Herkunft	Typ	Bezeichnung	Bezeichnung in Norm	Einheit	Abhängig von	
4	1	DIN 1448	Kegeliges Wellenende mit Außengewinde	d1_1448	d1	mm	N/A	
5	2	DIN 1448		l1_1448_l	l1 lang	mm	1	
6	3	DIN 1448		l1_1448_k	l1 kurz	mm	1	
7	4	DIN 1448		l2_1448_l	l2 lang	mm	1,2	
8	5	DIN 1448		l2_1448_k	l2 kurz	mm	1,3	
9	6	DIN 1448		l3_1448	l3	mm	1	
10	7	DIN 1448		t1_1448_l	l1 lang	mm	1,2	
11	8	DIN 1448		t1_1448_k	l1 kurz	mm	1,3	
12	9	DIN 1448		b_1448	b	mm	1	
13	10	DIN 1448		h_1448	h	mm	1	
14	11	DIN 1448	d2_1448	d2	mm	1		
15	12	DIN 1449	Kegeliges Wellenende	d1_1449	d1	mm	N/A	
16	13	DIN 1449		l1_1449_l	l1 lang	mm	12	
17	14	DIN 1449		l1_1449_k	l1 kurz	mm	12	
18	15	DIN 1449		l2_1449	l2	mm	12	
19	16	DIN 1449		l3_1449	l3	mm	12	
20	17	DIN 1449		l4_1449	l4	mm	12	
21	18	DIN 1449		t_1449_l	l lang	mm	12,13	
22	19	DIN 1449		t_1449_k	l kurz	mm	12,14	
23	20	DIN 1449		b_1449	b	mm	12	
24	21	DIN 1449		h_1449	h	mm	12	
25	22	DIN 1449	d2_1449	d2	mm	12		
26	23	DIN 1449	d3_1449	d3	mm	12		
27	24	DIN 748	Zylindrisches Wellenende	d_748_r1	d Reihe 1	mm	N/A	
28	25	DIN 748		d_748_r2	d Reihe 2	mm	N/A	
29	26	DIN 748		l_748_l	l lang	mm	24,25	
30	27	DIN 748		l_748_k	l kurz	mm	24,25	
31	28	DIN 748		r_748	r	mm	24,25	
32	29	DIN 250		Radius	r_250_r1	r Reihe 1	mm	N/A
33	30	DIN 250	r_250_r2		r Reihe 2	mm	N/A	
34	31	DIN 509-E	d1_509_e_1		d1 mit übl. Beanspr.	mm	N/A	
35	32	DIN 509-E	d1_509_e_2		d1 mit erh. Wechself.	mm	N/A	
36	33	DIN 509-E	r_509_e_r1		r Reihe 1	mm	31,32	
37	34	DIN 509-E	r_509_e_r2		r Reihe 2	mm	31,32	
38	35	DIN 509-E	Freistich Form E	t1_509_e	t1	mm	31,32	
39	36	DIN 509-E		f_509_e	f	mm	31,32	
40	37	DIN 509-F		d1_509_f_1	d1 mit übl. Beanspr.	mm	N/A	
41	38	DIN 509-F		d1_509_f_2	d1 mit erh. Wechself.	mm	N/A	
42	39	DIN 509-F		r_509_f_r1	r Reihe 1	mm	37,38	
43	40	DIN 509-F		r_509_f_r2	r Reihe 2	mm	37,38	
44	41	DIN 509-F	Freistich Form F	t1_509_f	t1	mm	37,38	
45	42	DIN 509-F		t2_509_f	t2	mm	37,38	
46	43	DIN 509-F		f_509_f	f	mm	37,38	
47	44	DIN 509-F		g_509_f	g	mm	37,38	
48	45	DIN 509-G		Freistich Form G	d1_509_g	d1 mit übl. Beanspr.	mm	N/A
49	46	DIN 509-G			r_509_g	r Reihe 1	mm	48
50	47	DIN 509-G	t1_509_g		t1	mm	48	
51	48	DIN 509-G	t2_509_g		t2	mm	48	
52	49	DIN 509-G	f_509_g		f	mm	48	
53	50	DIN 509-G	g_509_g		g	mm	48	
54	51	DIN 509-H	Freistich Form H	d1_509_h_1	d1 mit übl. Beanspr.	mm	N/A	
55	52	DIN 509-H		d1_509_h_2	d1 mit erh. Wechself.	mm	N/A	
56	53	DIN 509-H		r_509_h	r Reihe 1	mm	51,52	
57	54	DIN 509-H		t1_509_h	t1	mm	51,52	
58	55	DIN 509-H		t2_509_h	t2	mm	51,52	
59								
60								

	Tabelle1	Tabelle2	Tabelle3	+
--	----------	----------	----------	---

Abb. 4-24: Liste der voneinander abhängigen Features

Zwecks besserer Nachvollziehbarkeit und Aufbereitung der Informationen lassen sich die Abhängigkeiten auch durch sog. Prozessdatenblätter abbilden. Dabei handelt es sich um interaktiv verknüpfte Dokumente (Richtlinien, Normen oder Kataloge), durch die der Nutzer navigieren kann, um die benötigten zusammenhängenden Informationen gebündelt und übersichtlich zu erhalten. Ein beispielhafter Strukturaufbau der Prozessdatenblätter wird im Folgenden anhand eines Beispiels für

die rotationssymmetrisch hergestellten Werkstücke vorgestellt. Dabei handelt es sich um eine Vorgehensweise, welche im Rahmen eines gemeinsamen Verbundforschungsprojektes u. a. zwischen dem Lehrstuhl für Rechneinsatz in der Konstruktion der Universität Duisburg-Essen und dem Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus (ikt) der RWTH Aachen entwickelt wurde.

Die oberste Ebene eines Prozessdatenblattes (siehe Abb. 4-25) bildet das sog. Übersichtsblatt, welches mit weiteren Unterebenen (Menüblätter, Norm-/Werkzeugblätter und DIN-Normen) verknüpft ist.

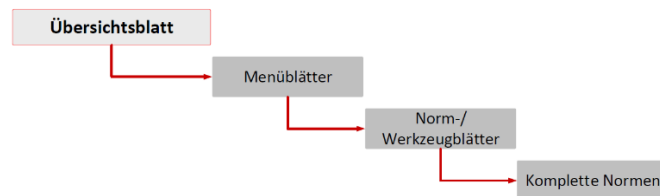


Abb. 4-25: Ebenen der Prozessdatenblätter

Der Aufbau eines Übersichtsblattes ist in der Abb. 4-26 abgebildet.

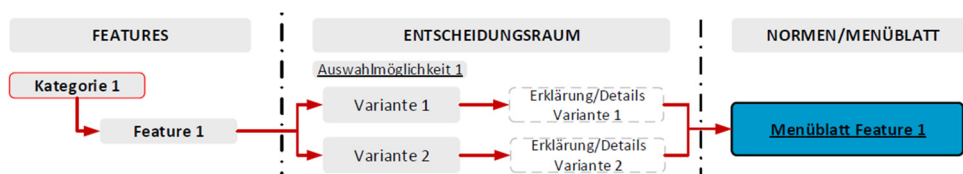


Abb. 4-26: Aufbau eines Übersichtsblattes

In der linken Spalte werden sämtliche Features aufgelistet, welche der Übersicht halber nach Kategorien sortiert sind. In der Mitte des Blatts befindet sich ein Entscheidungsraum. Hier werden mögliche Variationen des Features aufgeführt, Zusatzinformationen, Empfehlungen und Denkanstöße gegeben. Ein Feature soll möglichst in allen möglichen Ausführungen mithilfe des Entscheidungsraums nachkonstruierbar sein. Den rechten Teil des Blatts bilden die Hyperlinks zu den Menüblättern, bzw. teilweise direkt zu den DIN-Normen. Beispielhaft soll in Abb. 4-27 der Entscheidungsraum für das Feature Nuten aus dem Prozessblatt zum Drehen mit seinen Verknüpfungen dargestellt werden.

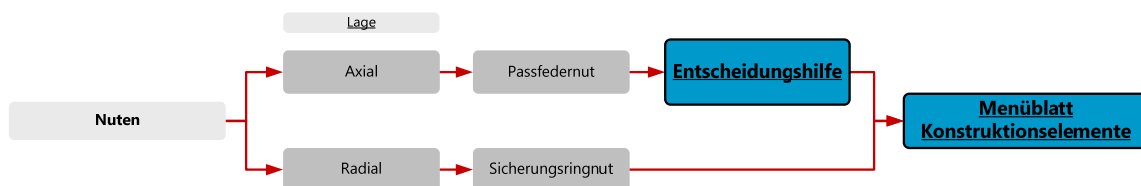


Abb. 4-27: Beispiel für den Entscheidungsraum

Generell lassen sich Nuten beim Drehen in Nuten in radialer Richtung und Nuten in axialer Richtung einteilen. Ein spezifischer Anwendungsfall für axiale Nuten sind Passfedernuten. Um aus diesen eine möglichst günstige Auswahl zu treffen, wird eine Entscheidungshilfe dem Nutzer an die Hand gegeben. Diese soll durch den Auswahlprozess der Passfederart leiten. Im Fall der Passfeder ist dies jedoch nicht eindeutig festlegbar, da die Auswahlmöglichkeiten der Norm keinem konkreten Benutzungsfall zugeordnet sind. Hier sind weitere Informationen z. B. firmenspezifische Werknormen notwendig.

Die Abb. 4-28 zeigt einen Auszug der beispielhaften Entscheidungshilfen für das Feature Zentrierbohrung, welche auf Basis der DIN-Normen entstanden sind. Diese sollen den zielführendsten Auswahlvorgang des Features aus den möglichen Lösungen unterstützen und teilweise das manuelle Nachschlagen in Normen oder Regelwerken ersetzen.

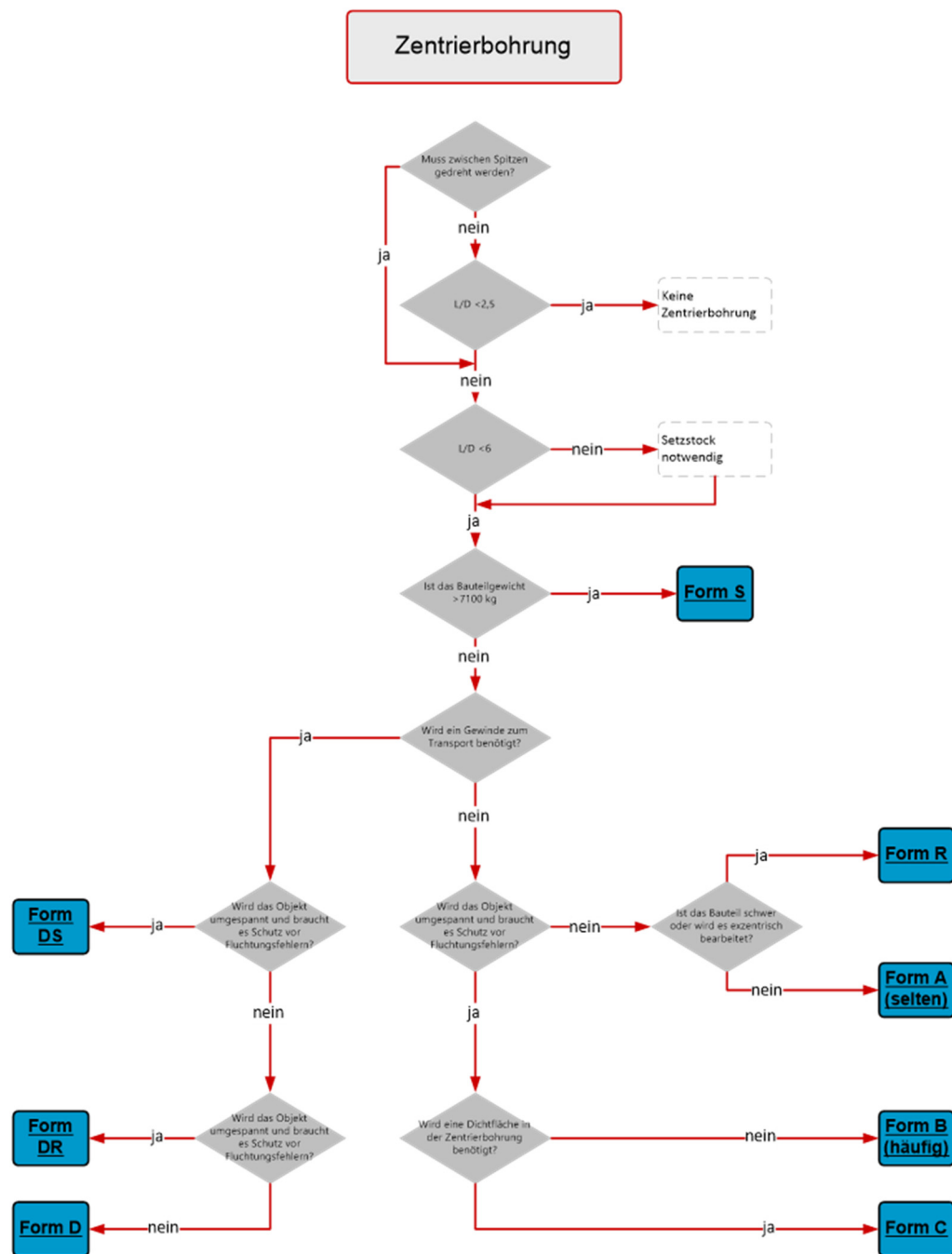


Abb. 4-28: Entscheidungshilfe für Zentrierbohrung

4.2.1.2 Konzeptionierung und Aufbau der Features

Die zu entwickelnden Features sollen neben der geometrischen Ausprägung zusätzlich semantische Informationen über die inhaltlichen Abhängigkeiten der einzelnen UDFs zueinander besitzen. Dazu gehören, wie bereits erwähnt, die Informationen über die verknüpften DIN-Normen. Es bedeutet,

falls in der Norm für das UDF ein Verweis auf eine weitere notwendige Norm vorliegt, soll diese Information in dem UDF festgehalten werden. Die Abb. 4-29 zeigt ein Beispiel für eine Passfedernut. Wird hier für die Passfedernut Form N ein Gewinde benötigt, so wird im UDF die entsprechende Norm zusätzlich angefragt, um von dort die benötigten Größen zu erhalten.

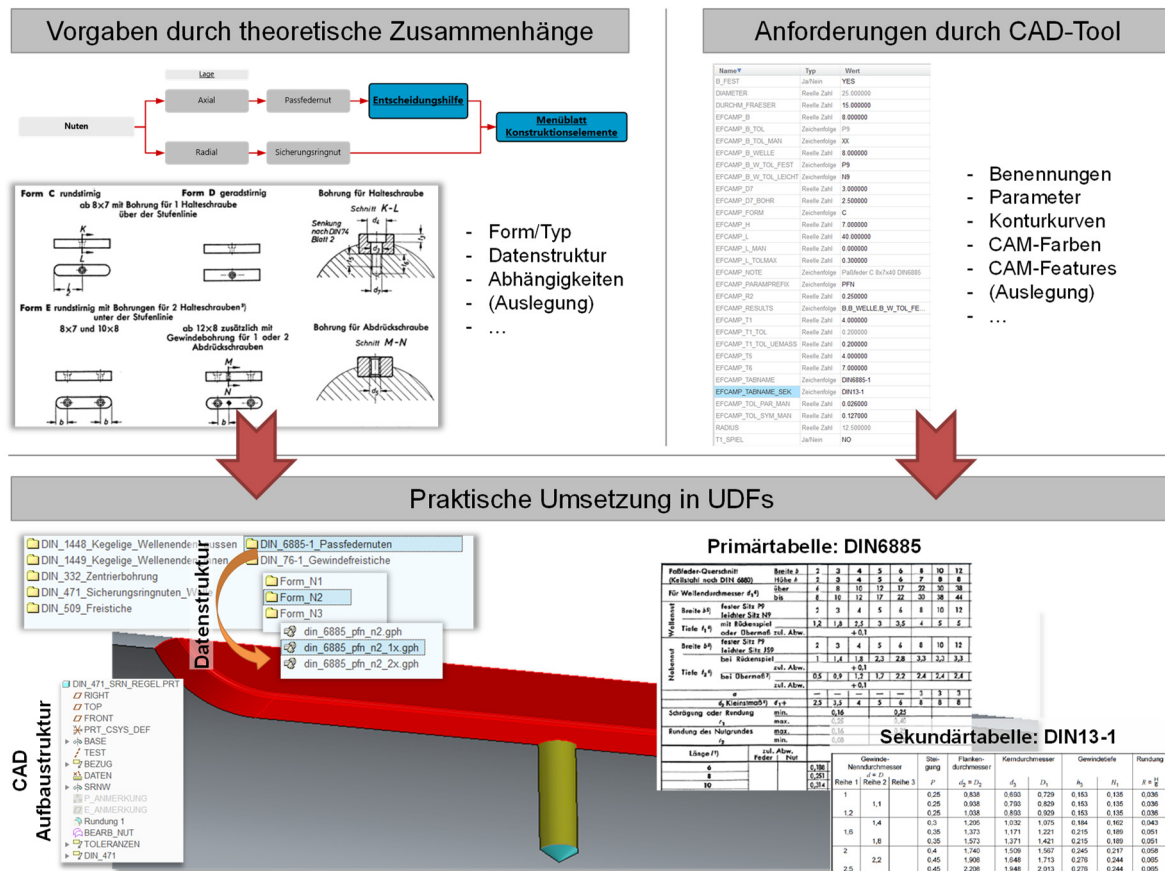


Abb. 4-29: Zusammenspiel aus Methodik und Fertigungsfeature

Selbstverständlich sollen neben den Informationen über normbedingte Abhängigkeiten auch weitere Informationen wie Größen und Bezeichnungen, Passungen/Maßtoleranzen, geometrische Toleranzen und Farbschlüssel für die Fertigungsschritte berücksichtigt werden.

Die Passungen/Maßtoleranzen beziehen sich auf die Angaben aus den DIN-Normen und sollen von dort eingelesen werden. Für die Funktionsweise des Modells innerhalb der CAD-CAM-Kette ist es erforderlich, dass das System die enthaltenen Informationen interpretieren kann, um das Modell für die Fertigung auf sog. Mittenmaße umzustellen. Es bedeutet, dass basierend auf dem Nennmaß der eingetragene Toleranzbereich ermittelt wird und die gemittelte Abweichung als Maß im Modell verwendet wird. Bei einer Abweichung von +0.5 mm/+0.3 mm führt das dazu, dass das tatsächlich im Modell vorhandene Maß nun um +0.4 mm größer dargestellt wird. Hierfür können die verfügbaren Systemfunktionalitäten genutzt werden. ISO-Toleranzen können auf diesem Weg nicht manipuliert werden. Sie werden innerhalb des CAD-Systems als semantische Information ausgewertet und einem weiteren Auswertungs- bzw. Optimierungsprozess verfügbar gemacht.

Geometrische Toleranzen wie Parallelität, Rundlauf und Rechtwinkligkeit sollen der entsprechenden Norm entnommen und als Anmerkungsfeature dem 3D-Feature hinzugefügt werden. Durch die Einbeziehung in eine Datenbankabfrage werden auch hier stets die aktuell gültigen Werte implementiert. Neben der zahlenmäßigen Beschreibung der geometrischen Toleranzen ist die Festlegung der Bezüge von großer Wichtigkeit. Folgendes Beispiel einer Sicherungsringnut nach DIN-

Norm [DIN471] zeigt eine mögliche Vorgehensstrategie. Laut dieser DIN-Norm benötigt eine Ringnut u. a. eine Rundlauf-toleranz mit Bezug auf die Achse des Durchmessers, welcher am gewünschten Wellenabsatz vorliegt. Da die Achse zumeist nicht ausschließlich als Bezug für die Ringnut verwendet wird, sondern außerdem für weitere Toleranzen gültig sein kann, die nicht in Verbindung mit dem Ringnut-Feature stehen, ist es nicht sinnvoll, diesen Bezug im UDF mitzuliefern, da so für ein und dieselbe Achse mehrere Bezüge entstünden. Dies wäre weder normgerecht noch überschaubar, wenn es um praxisrelevante komplexe Bauteile geht. Es wird also das Hauptmodell als treibende Quelle für Bezugselemente festgelegt. Beim Einbau des Ringnut-Features ist dann die entsprechende Achse zu wählen, wodurch ein direkter Bezug zum Hauptmodell hergestellt wird. Änderungen der Benennung etc. wirken sich durch die Parametrik des CAD-Systems durchgängig auf verknüpfte Features aus.

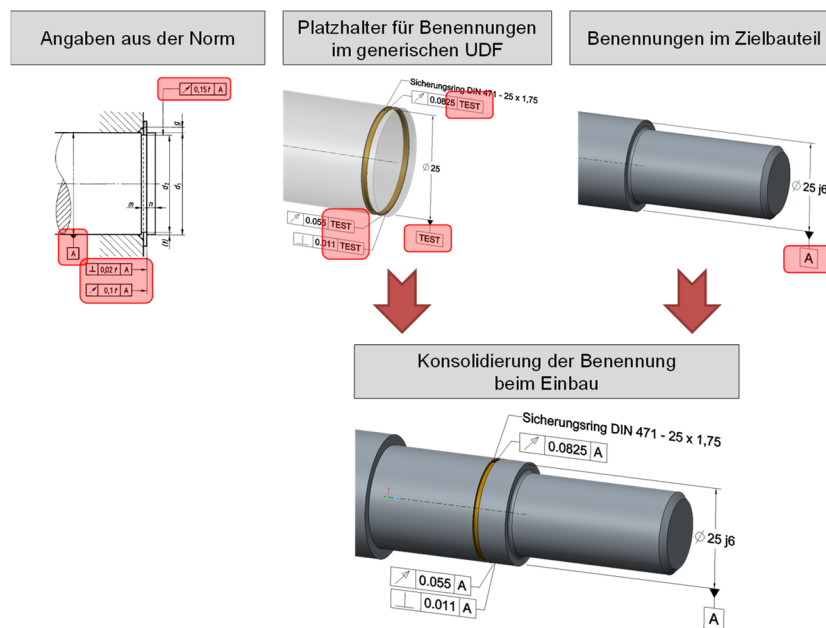


Abb. 4-30: Methodik der geometrischen Bezüge für Toleranzen

Die Darstellung der einzelnen genormten Featureinhalte basiert in der Regel auf der Art und Weise, wie sie in 2D-Zeichnungen genutzt wird. Um eine normgerechte und einheitliche Darstellung auch im 3D-Umfeld zu realisieren, bietet die ISO-Norm [DIN EN ISO1101] (Geometrische Produktspezifikation (GPS)) eine entsprechende Unterstützung im Bereich der Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf. Diese kann mit Bezug zur Positionierung der Hinweispfeile und Texte berücksichtigt werden, sodass eine zeitgemäße Darstellung der Informationen sichergestellt wird. Für eine verbesserte Handhabung und Nachvollziehbarkeit des Modells bzw. einzelner Fertigungsfeatures ist es sinnvoll, abweichend von der Norm weitere Informationen als Text zur Verfügung zu stellen. Diese werden durch Parameter dynamisch gehandhabt und bilden so stets den aktuellen Modellzustand ab, ohne auf dem herkömmlichen Weg zunächst eine Parameterliste aufrufen zu müssen.

Die Produktivitätssteigerung innerhalb der CAD-CAM-Prozesskette kann erreicht werden, wenn ein hoher Automatisierungsgrad erreicht wird. Ein dafür geeigneter Ansatz ist beispielweise die Kopplung der Geometrieinformationen mit Allgemeintoleranzen, GPS-Informationen und Oberflächenangaben mit Fertigungsinformationen und Verwendung von Farbschlüsseln, welche die jeweiligen Bearbeitungsschritte widerspiegeln. Die folgende Abbildung zeigt verschiedene Maßnahmen zur Erweiterung der Featuresemantik.

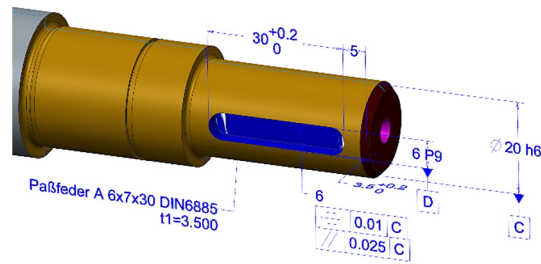


Abb. 4-31: Erweiterung der Featuresemantik

Zusätzlich zu der Verwendung von Farbschlüsseln lassen sich technologische Informationen über das einzusetzende Fertigungswerkzeug und Prozessparameter durch spezielle Fertigungsschablonen einbinden und an die 3D-CAD-Geometrie koppeln. Diese Informationen können während des CAM-Prozesses automatisiert aus den Fertigungsschablonen extrahiert werden. Die Ermittlung der geometriegebundenen Fertigungsinformationen und ihre Einbindung in die Fertigungsschablone erfolgt über die erwähnten Entscheidungshilfen. Diese unterstützen den Konstrukteur nicht nur bei der Dimensionierung und Bestimmung der Fertigungswerkzeuge und Parameter, sondern auch bei Entscheidungen über die Notwendigkeit des Features in dem zu konstruierenden Bauteil. Die Abb. 4-32 (vgl. auch Abb. 4-28) zeigt ein konzipiertes Beispiel eines Zentrierbohrung-Features mit Entscheidungshilfe und Fertigungsschablonen. Die Einbindung der besonderen Geometrie der Zentrierbohrung kann hier über ein Bohrungsfeature realisiert werden, indem je nach Form (z. B. A, B, C, R) ein entsprechender Querschnittsverlauf in dem Bohrungsfeature abgelegt wird.

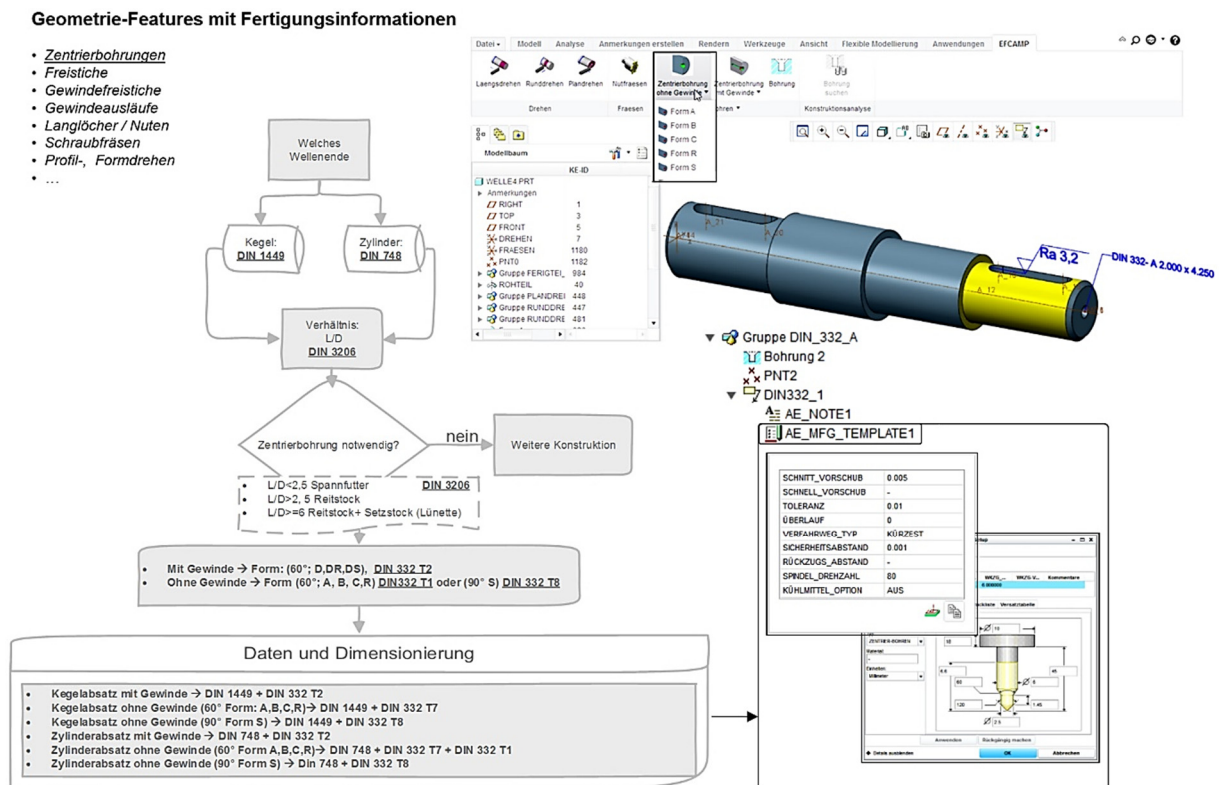


Abb. 4-32: Zentrierbohrung als Geometrie-Feature mit Fertigungsinformationen

Die Kopplung des standardisierten und genormten Konstruktionswissens und Fertigungswissens mit der CAD-Geometrie und eine Anbindung an die Datenbank garantieren zusätzlich, dass (Teil-) Modelle auf dem aktuellen Stand der Informationsbasis sind. Die UDFs bilden somit einen wichtigen

eigenständigen Informationsträger für den CAD-CAD-Prozess, da nicht alle Informationen zentral im CAD-System verwaltet werden müssen. Neben der Erweiterung der bestehenden Geometrie- und Semantik-Features ist aber auch eine geeignete Strategie zur Ermittlung der Abhängigkeiten und Zusammenhänge zwischen dem Konstruktions- und Fertigungswissen notwendig.

4.3 Einbindung technologischer Fertigungsinformationen

4.3.1 Konzept der Wissenskopplung

Für das Konzept der Wissenskopplung sind vor allem die Bereiche des relationalen Wissens (Regelwissen über die Objektbeziehungen) und strategisches Wissen zur Auswahl geeigneter Kombinationen von entscheidender Bedeutung. Hierbei stellt das rationale Wissen die Zuordnung von Form-Features (Geometrie) und Semantik-Features (z. B. Oberflächengüte und Toleranzen) zu den Fertigungsverfahren und ihren -schritten dar. Das strategische Wissen erschließt die Auswahl geeigneter Kombinationen der Fertigungsschritte und die Zuordnung der Bearbeitungswerkzeuge und Prozessparameter.

Betrachtet man das Gestaltungsbeispiel einer Getriebewelle, erfolgt ihre Grobgestaltung in den CAD-Systemen mittels der Form-Features (Rotationsfeatures). Hierauf folgt die Feingestaltung unter der Verwendung der im Abschnitt 4.2 vorgestellten norm- und fertigungsorientierten Features, wie Freitische, Wellennuten für Sicherungsringe und Passfedern sowie Zentrierbohrungen. Während der Instanziierung des Features wird systemintern und im Zusammenhang mit dem ausgewählten Absatzdurchmesser eine Geometrieanalyse ausgelöst, mit deren Hilfe alle relevanten Parameter und semantischen Informationen an die normgerechte Dimensionierung übergeben werden. Diese Informationen werden auch für die Ermittlung der Fertigungsschritte, Werkzeuge und Prozessparameter benötigt. Den Schlüssel zur Verknüpfung der beiden Wissensbereiche Konstruktion und Fertigung stellen die Geometriekonturen, Maß-, Toleranz-, Oberflächen- und Werkstoffangaben, welche die Bearbeitungsschritte, Werkzeuge und Prozessparameter beeinflussen. Durch die zugrunde liegenden DIN-Normen für die empfohlene Zuordnung von Rauheitswerten zu ISO-Toleranzen und Informationen über die tendenziell erreichbaren Maßtoleranzen oder Oberflächen in Abhängigkeit von dem jeweiligen Fertigungsverfahren lassen sich Rückschlüsse auf die Fertigungsstrategie treffen (z. B. [FHN05] [Sz93]).

Erreichbare Maßtoleranzen T_M in μm									
	0,8	1	5	10	15	20			
Glattwalzen									
Tiefziehen									
Walzen									
Drehen									
Hobeln									
Stoßen									
Schaben									
Bohren									
Aufbohren									
Senken									
Reiben									
Fräsen									
Räumen									
Teilen									
Schleifen									
Honen									
Läppen									

Empfohlene Zuordnung von Rauheitswerten zu ISO-Toleranzgraden									
Nennmaßbereich über ... bis mm	Empfohlene Werte für R_z und R_a μm	ISO-Toleranzgrad							
		5	6	7	8	9	10	11	
1 ... 6	R_z	2,5	4	6,3	6,3	10	16	25	
	R_a	0,4	0,8	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	
6 ... 10	R_z	2,5	4	6,3	10	16	25	40	
	R_a	0,4	0,8	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	
10 ... 18	R_z	4	6,3	10	16	25	40		
	R_a	0,8	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5		
18 ... 80	R_z	4	6,3	10	16	25	40	63	
	R_a	0,8	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5		
80 ... 250	R_z	6,3	10	16	25	40	63		
	R_a	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	12,5		
250 ... 500	R_z	6,3	10	16	25	40	63	100	
	R_a	0,8	1,6	1,6	3,2	6,3	12,5	25	

Erreichbare Rauheit von Oberflächen ¹⁾							
Fertigungsverfahren		Rz in µm bei Fertigungsverfahren			Ra in µm bei Fertigungsverfahren		
		genau min.	üblich von...bis	grob max.	genau min.	üblich von...bis	grob max.
Umformen	Gießen: Druckguss	4	10...100	160	–	0,8...30	–
	Kokillenguss	10	25...160	250	–	3,2...50	–
	Sandformguss	25	63...250	1000	–	12,5...50	–
	Sintern: Sinterglatt	–	2,5...10	–	–	0,4...1,6	–
	Kalibrierglatt	–	1,6...7	–	–	0,3...0,8	–
Umformen	Fließpressen	4	25...100	400	0,8	3,2...12,5	25
	Gesenksformen	10	63...400	1000	0,8	2,5...12,5	25
	Strangpressen	4	25...100	400	0,8	3,2...12,5	25
	Tiefziehen von Blechen	0,4	4...10	16	0,2	1...3,2	6,3
	Walzen: Glattwalzen	0,1	0,5...6,3	10	0,025	0,06...1,6	2
	Abtragen: Drahterodieren	0,8	2,8...10	16	0,1	0,4...1	3,2
	Senkerodieren	1,5	5...10	31	0,2	0,45	6,3
	Zerteilen: Autogenes Brennschneiden	16	40...100	1000	3,2	8...16	50
	Laserstrahlschneiden	–	10...100	–	–	1...10	–
	Plasmaschneiden	–	6...280	–	–	1...10	–
Trennen	Scherschneiden	–	10...63	–	–	1,6...12,5	–
	Wasserstrahlschneiden	4	16...100	400	1,6	6,3...25	50
	Spanen: Bohren: ins Volle bohren	16	40...160	250	1,6	6,3...12,5	25
	Aufbohren	0,1	2,5...25	40	0,05	0,4...3,2	12,5
	Senken	6,3	10...25	40	0,8	1,6...6,3	12,5
	Reiben	0,4	4...10	25	0,2	0,8...2	6,3
	Drehen: Längsdrehen	1	4...63	250	0,2	0,8...12,5	50
	Plandrehen	2,5	10...63	250	0,4	1,6...12,5	50
	Fräsen: Umfangs-, Stirnfräsen	1,6	10...63	160	0,4	1,6...12,5	25
	Honen: Kurzhubhonen	0,04	0,1...1	2,5	0,006	0,02...0,17	0,34
	Langhubhonen	0,04	1...11	15	0,006	0,13...0,65	1,6
	Läppen	0,04	0,25...1,6	10	0,006	0,025...0,2	0,21
	Polierläppen	–	0,04...0,25	0,4	–	0,005...0,035	0,05
	Schleifen	0,1	1,6...4	25	0,012	0,2...0,8	6,3

¹⁾ Rauheitswerte, sofern sie nicht in DIN 4766-1 (zurückgezogen) enthalten sind, nach Angaben der Industrie.

Ablese-Beispiel:

Reiben (für Oberflächenkenngröße Rz)

genaue Fertigung $R_{z\min} = 0,4$ $R_z = 4$ $R_z = 10$ übliche Fertigung $R_z = 10$ grobe Fertigung $R_{z\max} = 25$

Abb. 4-33: Tendenzielle Zuordnung zum Fertigungsverfahren [Sz93] und [FHN05]

Die Zuordnung der erforderlichen Fertigungsschritte zu den aus der Funktions- und Konstruktions-sicht beabsichtigten Toleranz- und Oberflächenangaben lässt sich prinzipiell realisieren, indem für die ISO-Toleranzgrade und Rauheitswerte die möglichen Bearbeitungsschritte definiert werden (vgl. Tabelle 4-1 und Abb. 4-34).

Tabelle 4-1: Zuordnung der Rauheitswerte zu Bearbeitungsschritten		
Schruppen	$R_a 12,5 - R_a 25$	$R_z 36 - R_z 160$
Schlichten	$R_a 3,2 - R_a 6,3$	$R_z 10 - R_z 40$
Feinschlichten	$R_a 0,0025 - R_a 1,6$	$R_z 0,4 - R_z 6,3$

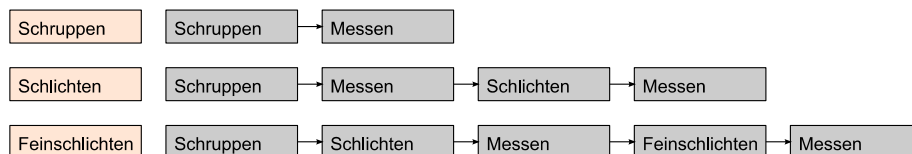








Abb. 4-34: Reihenfolge der benötigten Bearbeitungsschritte

Die Zuordnung geeigneter Bearbeitungswerkzeuge und Prozessparameter zu den Bearbeitungsschritten basiert grundsätzlich auf den geometrie- und werkstoffabhängigen Merkmalen. Die in der Abb. 4-35 prinzipiell dargestellten Zusammenhänge werden in den meisten Werkzeugkatalogen (z. B. [Sa14a], [Sa13], [Sa15], [Ho16]) und Datenbanken nach werkstoffverarbeitenden Eigenschaften und Bearbeitungsbedingungen (gute¹¹, mittlere¹², schwierige¹³) abgelegt.













¹¹ Gute Bedingungen: Bearbeitung ohne Schnittunterbrechung und mit hohen Schnittgeschwindigkeiten bei sicherer Werkstückaufspannung. Vorbearbeitete Werkstücke und Werkstücke mit leichter Guss-/Schmiedehaut [Sa14a].

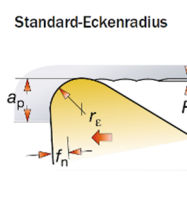
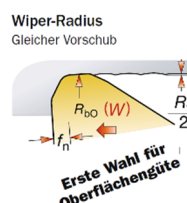
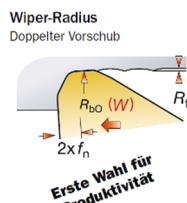
¹² Mittlere Bedingungen: erste Wahl für die allgemeine Bearbeitung mit leichten Schnittunterbrechungen und mit mittleren Schnittgeschwindigkeiten bei guter Werkstückaufspannung. Geschmiedete oder gegossene Werkstücke [Sa14a].

¹³ Schwierige Bedingungen: Schnittunterbrechungen oder schwere Schruppbearbeitung mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten und bei schwacher Werkstückaufspannung. Schwere Guss- und Schmiedehaut [Sa14a].

ISO/ANSI P STAHL		
Schlichten	Mittlere Bearbeitung	Schruppen
-WF / GC4315 -PF / GC4315	-WMX / GC4305 -PM / GC4315	-WR / GC4305 -PR / GC4315
 -WF / GC4315	 -WMX / GC4315	 -WR / GC4315
 -PF / GC4315	 -PM / GC4325	 -PR / GC4325
-WF / GC4325 -PF / GC4325	-WMX / GC4325 -PM / GC4325	-WR / GC4325 -PR / GC4325

BEDINGUNGEN

ISO/ANSI	P M	<h1>MITTLERE BEARBEITUNG VON STAHL</h1> <h2>Wendeschneidplatten mit negativer Grundform</h2>																																													
<h3>BESTELLNUMMER</h3>		      		<h3>SCHNITTDATEN, CMC 02.1 / HB 180</h3> <p>Schnittgeschwindigkeit, v_c (m/min)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Schnitttiefe a_p mm</th><th>Vorschub f mm/U</th><th>GC4305</th><th>GC4315</th><th>GC4325</th><th>GC4335</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3 (0,5-5)</td><td>0,45 (0,15-0,7)</td><td>390</td><td>350</td><td>290</td><td>275</td></tr> <tr> <td>3,5 (0,8-6)</td><td>0,5 (0,2-0,7)</td><td>370</td><td>335</td><td>275</td><td>275</td></tr> <tr> <td>3,5 (0,8-6)</td><td>0,45 (0,15-0,7)</td><td>390</td><td>350</td><td>290</td><td>275</td></tr> <tr> <td>3,5 (0,8-6)</td><td>0,5 (0,2-0,7)</td><td>370</td><td>335</td><td>275</td><td>275</td></tr> </tbody> </table>		Schnitttiefe a _p mm	Vorschub f mm/U	GC4305	GC4315	GC4325	GC4335	3 (0,5-5)	0,45 (0,15-0,7)	390	350	290	275	3,5 (0,8-6)	0,5 (0,2-0,7)	370	335	275	275	3,5 (0,8-6)	0,45 (0,15-0,7)	390	350	290	275	3,5 (0,8-6)	0,5 (0,2-0,7)	370	335	275	275												
Schnitttiefe a _p mm	Vorschub f mm/U	GC4305	GC4315	GC4325	GC4335																																										
3 (0,5-5)	0,45 (0,15-0,7)	390	350	290	275																																										
3,5 (0,8-6)	0,5 (0,2-0,7)	370	335	275	275																																										
3,5 (0,8-6)	0,45 (0,15-0,7)	390	350	290	275																																										
3,5 (0,8-6)	0,5 (0,2-0,7)	370	335	275	275																																										
<h4>Doppelseitig</h4>				<table border="1"> <tbody> <tr> <td>12 04 08-WMX</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td></tr> <tr> <td>12 04 12-WMX</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td></tr> <tr> <td>16 06 08-WMX</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td></tr> <tr> <td>16 06 12-WMX</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td></tr> </tbody> </table>		12 04 08-WMX	☆	☆	☆	☆	☆	12 04 12-WMX	☆	☆	☆	☆	☆	16 06 08-WMX	☆	☆	☆	☆	☆	16 06 12-WMX	☆	☆	☆	☆	☆																		
12 04 08-WMX	☆	☆	☆	☆	☆																																										
12 04 12-WMX	☆	☆	☆	☆	☆																																										
16 06 08-WMX	☆	☆	☆	☆	☆																																										
16 06 12-WMX	☆	☆	☆	☆	☆																																										
		<table border="1"> <tbody> <tr> <td>15 06 08-WMX</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td></tr> <tr> <td>15 06 12-WMX</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td></tr> <tr> <td>15 06 16-WMX</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td></tr> </tbody> </table>		15 06 08-WMX	☆	☆	☆	☆	☆	15 06 12-WMX	☆	☆	☆	☆	☆	15 06 16-WMX	☆	☆	☆	☆	☆	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>3 (0,5-5)</td><td>0,45 (0,15-0,7)</td><td>390</td><td>350</td><td>290</td><td>275</td></tr> <tr> <td>3,5 (0,8-6)</td><td>0,5 (0,2-0,7)</td><td>370</td><td>335</td><td>275</td><td>275</td></tr> <tr> <td>3,5 (0,5-6)</td><td>0,5 (0,2-0,8)</td><td>370</td><td>335</td><td>275</td><td>275</td></tr> </tbody> </table>		3 (0,5-5)	0,45 (0,15-0,7)	390	350	290	275	3,5 (0,8-6)	0,5 (0,2-0,7)	370	335	275	275	3,5 (0,5-6)	0,5 (0,2-0,8)	370	335	275	275						
15 06 08-WMX	☆	☆	☆	☆	☆																																										
15 06 12-WMX	☆	☆	☆	☆	☆																																										
15 06 16-WMX	☆	☆	☆	☆	☆																																										
3 (0,5-5)	0,45 (0,15-0,7)	390	350	290	275																																										
3,5 (0,8-6)	0,5 (0,2-0,7)	370	335	275	275																																										
3,5 (0,5-6)	0,5 (0,2-0,8)	370	335	275	275																																										
		<table border="1"> <tbody> <tr> <td>16 04 08-WMX</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td></tr> <tr> <td>16 04 12-WMX</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td></tr> </tbody> </table>		16 04 08-WMX	☆	☆	☆	☆	☆	16 04 12-WMX	☆	☆	☆	☆	☆	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>3 (0,5-5)</td><td>0,45 (0,15-0,7)</td><td>390</td><td>350</td><td>290</td><td>275</td></tr> <tr> <td>3,5 (0,8-6)</td><td>0,5 (0,2-0,7)</td><td>370</td><td>335</td><td>275</td><td>275</td></tr> </tbody> </table>		3 (0,5-5)	0,45 (0,15-0,7)	390	350	290	275	3,5 (0,8-6)	0,5 (0,2-0,7)	370	335	275	275																		
16 04 08-WMX	☆	☆	☆	☆	☆																																										
16 04 12-WMX	☆	☆	☆	☆	☆																																										
3 (0,5-5)	0,45 (0,15-0,7)	390	350	290	275																																										
3,5 (0,8-6)	0,5 (0,2-0,7)	370	335	275	275																																										
		<table border="1"> <tbody> <tr> <td>06 04 08-WMX</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td></tr> <tr> <td>06 04 12-WMX</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td></tr> <tr> <td>08 04 08-WMX</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td></tr> <tr> <td>08 04 12-WMX</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td><td>☆</td></tr> </tbody> </table>		06 04 08-WMX	☆	☆	☆	☆	☆	06 04 12-WMX	☆	☆	☆	☆	☆	08 04 08-WMX	☆	☆	☆	☆	☆	08 04 12-WMX	☆	☆	☆	☆	☆	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>3 (0,5-5)</td><td>0,45 (0,15-0,7)</td><td>390</td><td>350</td><td>290</td><td>275</td></tr> <tr> <td>3,5 (0,8-6)</td><td>0,5 (0,2-0,7)</td><td>370</td><td>335</td><td>275</td><td>275</td></tr> <tr> <td>3,5 (0,5-6)</td><td>0,5 (0,2-0,7)</td><td>370</td><td>335</td><td>275</td><td>275</td></tr> </tbody> </table>		3 (0,5-5)	0,45 (0,15-0,7)	390	350	290	275	3,5 (0,8-6)	0,5 (0,2-0,7)	370	335	275	275	3,5 (0,5-6)	0,5 (0,2-0,7)	370	335	275	275
06 04 08-WMX	☆	☆	☆	☆	☆																																										
06 04 12-WMX	☆	☆	☆	☆	☆																																										
08 04 08-WMX	☆	☆	☆	☆	☆																																										
08 04 12-WMX	☆	☆	☆	☆	☆																																										
3 (0,5-5)	0,45 (0,15-0,7)	390	350	290	275																																										
3,5 (0,8-6)	0,5 (0,2-0,7)	370	335	275	275																																										
3,5 (0,5-6)	0,5 (0,2-0,7)	370	335	275	275																																										



Vorschub, f_n	Standard	Wiper (WF/WM)	Standard	Wiper (WMX)	Standard	Wiper (WMX)
mm/U	r_s 0.4 R_s μ m	r_s 0.4 R_s μ m	r_s 0.8 R_s μ m	r_s 0.8 R_s μ m	r_s 1.2 R_s μ m	r_s 1.2 R_s μ m
0.07	0.31	0.30	–	–	–	–
0.10	0.63	0.32	0.31	–	–	–
0.12	0.90	0.45	0.45	–	–	–
0.15	1.41	0.70	0.70	0.25	0.47	–
0.18	2.03	1.00	1.01	0.30	0.68	–
0.20	2.50	1.25	1.25	0.35	0.83	0.30
0.22	3.48	1.74	1.74	0.40	1.16	0.30
0.25	–	–	2.25	0.45	1.50	0.40
0.28	–	–	2.82	0.50	1.88	0.40
0.30	–	–	3.23	0.55	2.16	0.40
0.35	–	–	4.40	0.60	2.93	0.50
0.40	–	–	5.75	0.70	3.83	0.65
0.45	–	–	8.54	1.10	5.70	0.85
0.50	–	–	10.55	1.30	7.03	1.15
0.55	–	–	–	–	8.51	1.20
0.60	–	–	–	–	10.13	1.30

Abb. 4-35: Zusammenhänge zwischen dem Bearbeitungswerkzeug und den Prozessparametern nach [Sa14a]

Dabei gilt es z. B. bei den Schruppvorgängen der Drehbearbeitung, den größtmöglichen Eckenradius zu wählen und die Zustellung im Verhältnis zum Eckenradius zu setzen. Die maximale Größe wird durch den zu fertigenden Geometriebereich (Konturverlauf) beeinflusst. Bei den Schlichtvorgängen ist der Eckenradius in Abhängigkeit von dem geforderten Rauheitswert zu wählen (vgl. auch Abschnitt 4.3.2).

Neben den Oberflächenangaben und Toleranzen gibt es noch weitere Angaben, die über die anzuwendenden Fertigungsverfahren entscheiden. Dazu gehören die Form- und Lagetoleranzen. Wird z. B. eine Rundlauftoleranz angebracht, so ist eine Bearbeitung mit Zentrierspitze empfohlen, um der Toleranz zu entsprechen. Dafür ist wiederum eine Zentrierbohrung vorzusehen.

Auch die Werkstücknullpunkte sollen mitbetrachtet und als Koordinatensysteme mit bearbeitungsweisender Richtung hinterlegt werden. Bei einer Welle werden die Werkstücknullpunkte jeweils an dem Wellenende definiert, an dem die Bearbeitung erfolgt. Die Abb. 4-36 stellt ein Beispiel für die Festlegung der Werkstücknullpunkte dar.

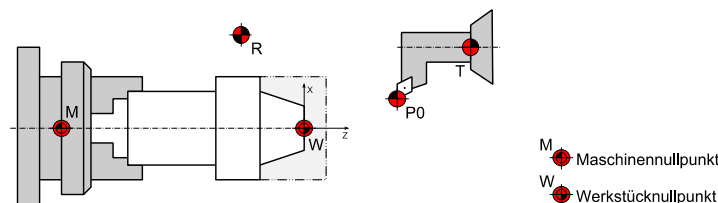


Abb. 4-36: Bezugspunkte, Achsen bei einer Drehmaschine

Der erste Absatz der Welle bezieht sich auf das Koordinatensystem Drehen, die Achse der Absätze entspricht der Z-Achse, die Planflächen liegen parallel zu der XY-Ebene. Diese Ausrichtung ist für die Verwendung des Modells in einem CAM-System hilfreich, da die CNC-Programmierung mit dieser Anordnung arbeitet. Die Z-Achse liegt immer in Richtung der Hauptspindel. Wird das Bauteil bereits

in dem CAD-System richtig ausgerichtet, entfällt in der späteren Verarbeitung eine erneute Festlegung des Koordinatensystems.

Das Konzept für die Nutzung der normgerechten und fertigungsorientierten Features und das Prinzip der Wissenskapplung ist in der Abb. 4-37 dargestellt.

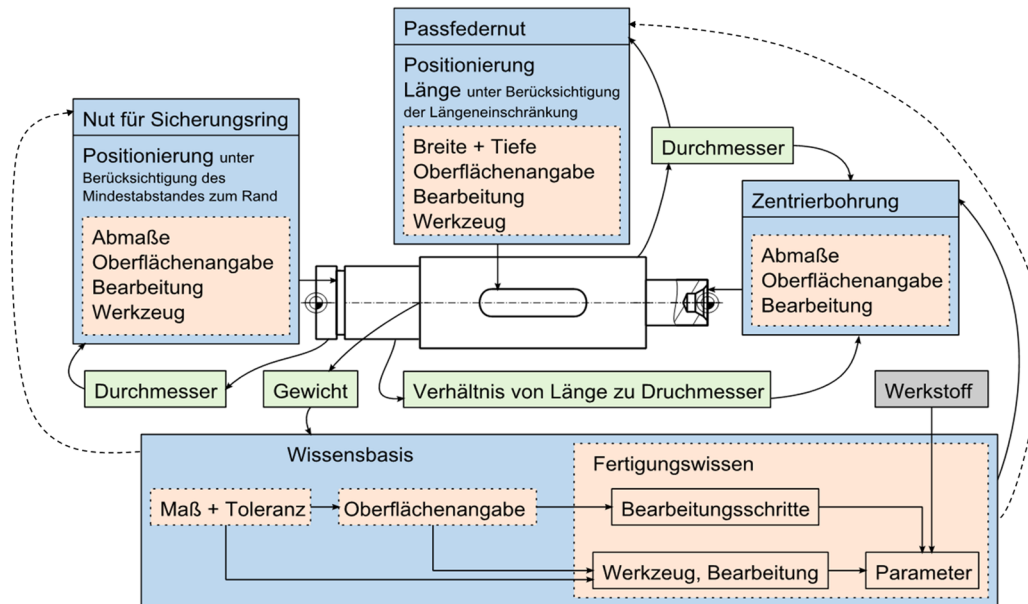


Abb. 4-37: Konzept der Wissenskapplung

Im Beispielfall der Instanziierung eines Passfedernut-Features werden die Breite und die Tiefe der Nut, sowie die zugehörigen Toleranzen in Abhängigkeit vom Durchmesser des Absatzes bestimmt. Soll die Passfeder fest in der Nut sitzen, wird eine Toleranz von P9 vorgeschlagen [DIN6885]. Daraus würde sich beispielsweise beim Absatzdurchmesser zwischen 18 mm und 80 mm ein Rauheitswert von Ra 3,2 ergeben (vgl. Abb. 4-33). Um eine Oberfläche mit einem Rauheitswert von Ra 3,2 zu erreichen, müsste laut der Tabelle 4-1 eine Fläche geschlichtet werden und die entsprechenden Fertigungsschritte würden aus den Vorgängen des Schruppens, Messens, Schlichtens und anschließenden Messens bestehen. Die Parameter des Bearbeitungsvorganges sind ein Resultat aus der Featuregeometrie selbst, also der Form (hier ein Langloch) und dem Maß für die Breite. Diese beiden Faktoren sind für die Ermittlung der Bearbeitungsparameter sowie des Bearbeitungswerkzeuges wichtig. Für die Fertigung eines Langlochs wird ein Schaftfräser mit ebener Stirn empfohlen. Der maximale Durchmesser des Fräasers wird gleich oder kleiner der Nutbreite gesetzt. Somit sind alle nötigen Informationen für die Bestimmung der Parameter zusammengetragen. Da die Passfedernuten meist gefräst werden, muss also das Werkstück auf eine Fräsmaschine umgespannt werden. Die Schnittgeschwindigkeit, Schnitttiefe, Vorschub sowie die Zustellung ergeben sich aus der Kombination aus dem Werkzeug, Maschine und Werkstoff des Bauteils, welche mit dem Fertigungswissen und den in den Datenbanken zur Verfügung gestellten Daten und Informationen zu ermitteln sind (siehe Abschnitt 4.3.2).

Alternativ lassen sich auch durch eine entsprechende Einbindung digitaler Werkzeugkataloge (z. B. der Fa. SANDVIK) an das CAD-System die Empfehlungen über die Anzahl der Fertigungsschritte, dazugehörigen Werkzeuge und die Technologieparameter ausgeben (siehe Abb. 4-38). Hierbei basiert jedoch die Bestimmung der Fertigungsschritte mit dazugehörigen technologischen Parametern und Werkzeugen auf der Auswahl der Werkstoffgruppe, Angaben über die Geometrieausprägung des zu

entfernenden Materials und Angaben der Oberflächengüte. Die Toleranz- und Passungsangaben sind nicht möglich.

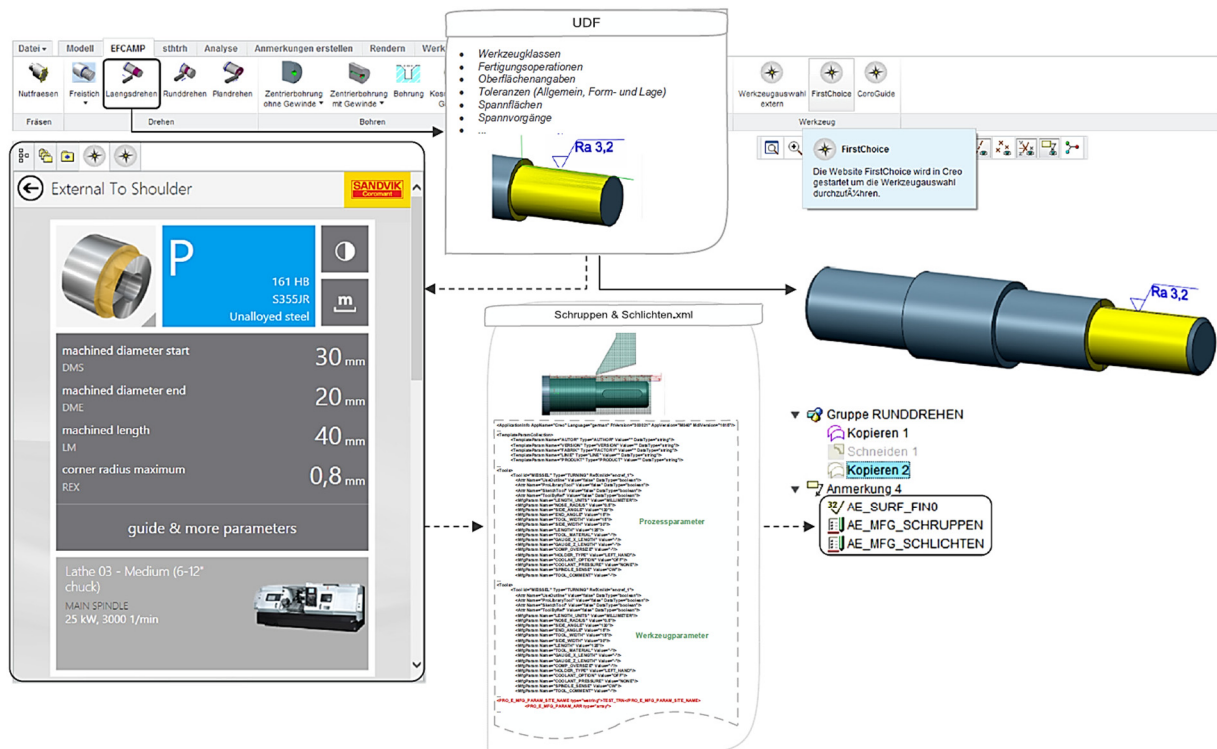


Abb. 4-38: Anbindung der Fertigungsinformationen an die CAD-Geometrie

Die fertigungsrelevanten Informationen werden in CAD-Systemen in Form von sog. PMI-Objekten wie z. B. Fertigungsschablonen festgehalten und an die Geometrie gekoppelt (vgl. Abb. 4-38).

4.3.2 Erschließung des strategischen Wissens

Wie bereits erwähnt, erschließt das strategische Wissen die Auswahl geeigneter Kombinationen der Fertigungsschritte und die Zuordnung von Bearbeitungswerkzeugen und Prozessparametern in Abhängigkeit von der Geometriekontur, Toleranz-, Passungs-, Oberfläche- und Werkstoffangaben.

Da mit einem Großteil der Werkzeuge die Herstellung verschiedener Geometrie möglich ist, wird für eine eindeutige Beschreibung der geometriegebundenen Fertigungsschritte ein Begriff „Task“ eingeführt. Ein Task wird als ein Arbeitsgang definiert, der ohne Werkzeug-, Maschinenwechsel und Umspannen durchgeführt werden kann (z. B. Plandrehen-Schruppen oder Plandrehen-Schlichten, Längsdrehen-Schruppen, Längsdrehen-Schlichten, Einstechen, Nut-Fräsen etc.) Ein Task stellt damit die kleinste Einheit dar, die dann bei der Festlegung einer Fertigungsreihenfolge variiert werden kann. Der Werkzeugwechsel und die Umspannvorgänge können dann jeweils als die Übergangsbedingungen zwischen zwei benachbarten Tasks in einer Fertigungsreihenfolge betrachtet werden. Die ausgewählten Werkzeuge und Spannflächen sind somit die Eigenschaften eines Tasks.

Für die Entwicklung einer Strategie zur Wissensauswertung sollen folgende Zusammenhänge und Angaben bekannt sein:

- die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Tasks und geforderten geometrischen Toleranzen sowie Oberflächenangaben für die Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen und Bohren,
- die Zusammenhänge zwischen Werkstoffen und Werkzeugen,

- die Angaben zu den technologischen Parametern wie z. B. Schnittwerten, standardisierten Aufmaßwerten für den jeweiligen Arbeitsgang beim vorgegebenen Task.

Diese erforderlichen Informationen lassen sich durch die Erfassung realer Fertigungsabläufe gewinnen und in Form von Excel-Tabellen festhalten (vgl. Abb. 4-39), welche später auch in geeigneter Form in Datenbanken abgelegt werden können.

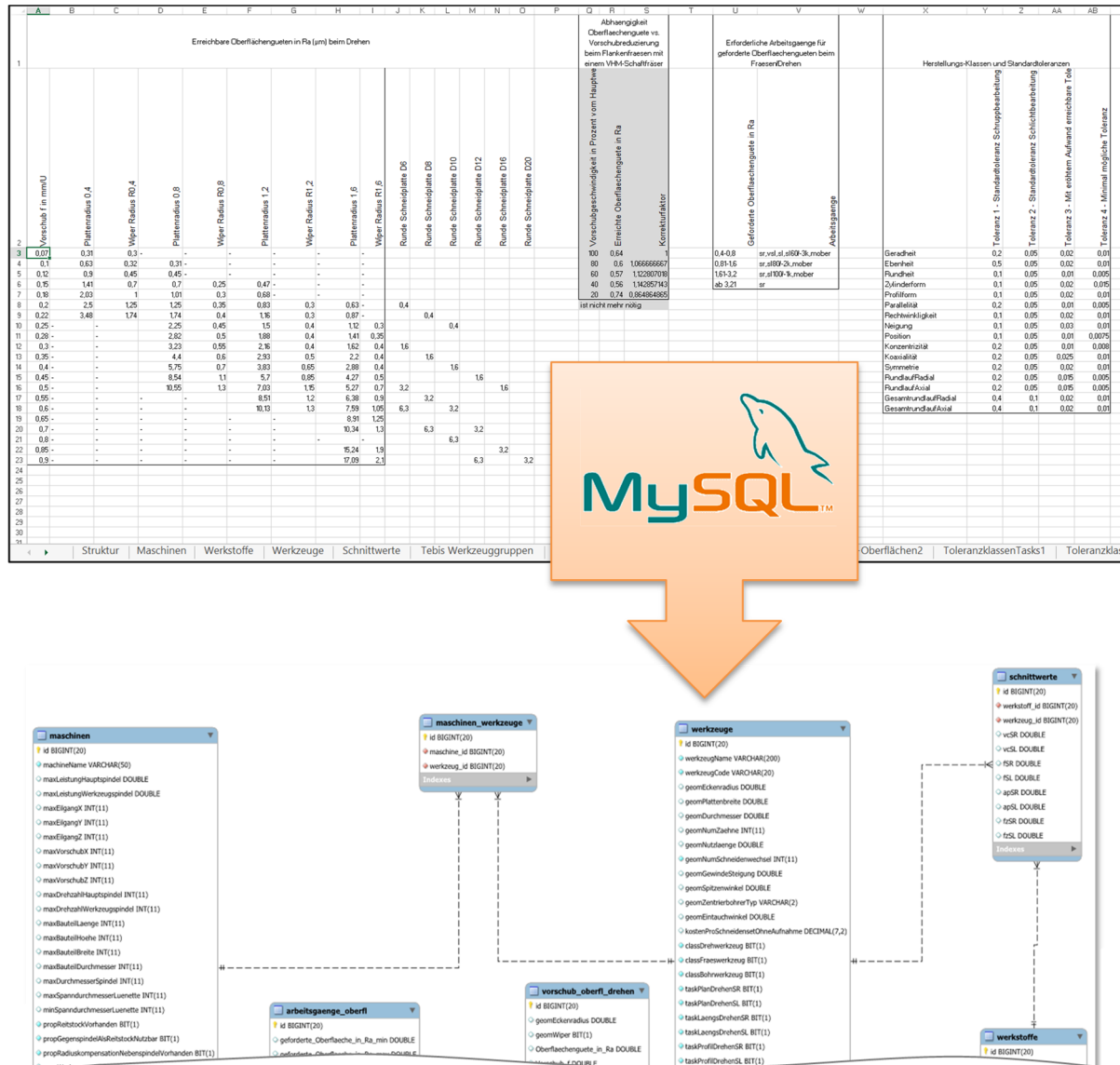


Abb. 4-39: Verknüpfung der fertigungsrelevanten Informationen

Die Grundidee der Strategie zur Wissenskapplung ist in der Abb. 4-40 anhand eines Beispiels für eine Absatzkontur aufgezeigt. Sie basiert auf dem direkten Vergleich der erforderlichen Arbeitsschritte zur Herstellung eines Geometriebereiches mit vorgegebenen Eigenschaften wie Toleranz- und Oberflächenangaben. Es bedeutet, dass wenn dem Wellenabsatz eine Oberflächenangabe und eine ISO-Passung zugeordnet sind und somit auch jeweils die Bearbeitungsschritte, wird letztlich die Bearbeitung bevorzugt, welche mehrere Schritte enthält (vgl. Abb. 4-40). Der „Gewinner“ bekommt jedoch am Ende einen zusätzlichen Schritt der Eigenschaftsmessung des „Verlierers“.

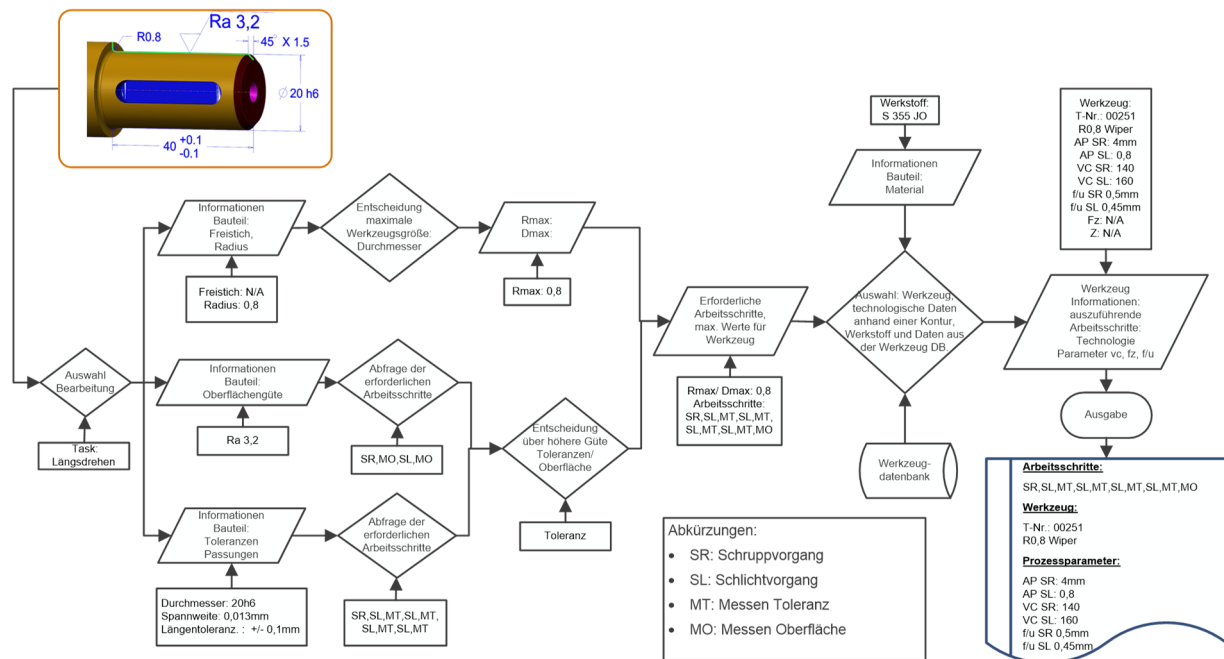


Abb. 4-40: Strategie der Wissensauswertung

Die Zuordnung des Werkzeugs zu dem Task (Längsdrehen-SR und Längsdrehen-SL) basiert auf der Auswertung der Bauteilinformation (Radien- und Bogenwerte der Bauteilkontur) und Entscheidung über die Wahl der maximalen Werkzeuggröße über den Eckenradius eines Drehwerkzeugs oder des Durchmessers eines Fräasers. Anhand der den Werkstoffklassen zugeordneten Bearbeitungswerkzeuge und bevorzugten Bearbeitungsbedingungen erfolgt die weitere Vorauswahl und letztlich ein Vorschlag für ein Werkzeug. Die Prozessparameter wie Vorschubgeschwindigkeit (f/f_z) oder Schnittgeschwindigkeit (v_c) werden aus dem vorgeschlagenen Werkzeug entnommen (vgl. auch Abb. 4-35).

4.4 Zerspanungsgerechte Prüffunktionen zur Analyse der 3D-CAD-Modelle

Nach der im Abschnitt 3.3 durchgeführten Analyse der Softwaretools zur fertigungsorientierten Geometrieanalyse der 3D-CAD-Daten wird in diesem Abschnitt beispielhaft auf die Implementierungsmöglichkeit der Custom-Checks für das DFMPPro-Tool hinsichtlich der verschiedenen geometrischen und fertigungsrelevanten Aspekte aus dem in dieser Arbeit betrachteten Bauteilspektrum eingegangen. Bei einer Getriebewelle gehört beispielsweise die Identifizierung von möglichen Spannflächen für die Fertigungsbearbeitung dazu. In der Praxis werden dazu einige Regeln angewandt, die besagen, dass beispielsweise der Wellenabsatz mit dem größten Durchmesser als Aufspannfläche zu bevorzugen ist, oder dass das Aufspannen auf den unbearbeiteten Flächen aufgrund der Maßhaltigkeit nur beim ersten Aufspannen erlaubt ist, danach nicht mehr. Im weiteren Fertigungsverlauf ist grundsätzlich jede zylindrische Fläche als Spannfläche mit einer Länge von mehr als 20 mm geeignet, welche jedoch mindestens einmal geschruppt wurde. Konische Flächen sind als Spannflächen zu vermeiden. Somit ist für die Implementierung der Regel als Custom-Check in DFMPPro die Ermittlung des größten Wellenabsatzes notwendig. Diese lässt sich beispielhaft durch die Programmierung einer Custom-Funktion zur Ermittlung der größten radialen Dimensionen realisieren (vgl. Abb. 4-41).


```

'Funktion um den Wellenabsatz mit dem groessten Durchmesser auszulesen

Function Absatz_max(ByRef featurelist As DFMMillTurnEngineComponentLib.
IDFMMillTurnFeatures) As DFMMillTurnEngineComponentLib.IDFMMillTurnFeature
    Dim Featureanzahl As Long = featurelist.Count
    'Groesster Absatzradius:
    Dim R_max As Double = 0
    'Feature das dem groessten Absatz entspricht:
    Dim feature_max As DFMMillTurnEngineComponentLib.IDFMMillTurnFeature = featurelist
    .Item(0)
    For i As Long = 0 To Featureanzahl - 1
        Dim feature As DFMMillTurnEngineComponentLib.IDFMMillTurnFeature
        feature = featurelist.Item(i)
        If IsRequiredFeatureType(feature) = True Then
            Dim feat As DFMMillTurnEngineComponentLib.
IDFMMillTurnExternalElementFeature = feature
            Dim BottomRadius As Double = feat.GetBottomCircleRadius
            Dim TopRadius As Double = feat.GetTopCircleRadius
            If TopRadius > R_max Then
                R_max = BottomRadius
                feature_max = feature
            End If
            If BottomRadius > R_max Then
                R_max = BottomRadius
                feature_max = feature
            End If
        End If
    Next
    Return feature_max
End Function

```

Abb. 4-41: Funktion zur Ermittlung eines Absatzes mit größtem Durchmesser

Zur Sicherstellung, dass die Spannstelle zylinderförmig ist und den Vorgabewert nicht unterschreitet, können entsprechende Größen (Radien und Längen) an Start- und Endposition des Absatzes in einfacher Art und Weise miteinander verglichen werden (siehe Abb. 4-42).

```

'Ermitteln ob Absatz Zylindrig ist. Hierzu vergleichen ob die Absatzradien
gleich sind:
If (TopRadius + Tol) > BottomRadius And (TopRadius - Tol) < BottomRadius Then
    Zyl = True
End If

If Zyl = False Then

    'Fehlermeldung und Markieren des Features:
    Dim strErrorMessage As String = "Die Spannstelle sollte zylindrig und der
Wellenabsatz mit dem groessten Durchmesser sein. Sonst sind zusaetzhche
Sonderkonstruktionen oder der Einsatz von Luenette und Reitstock notwendig!"
    MarkFailedFeature(feature, strErrorMessage)
Else
    SetPassedInstance()
End If

'Anfangs- und Endposition des Absatzes:
Dim BottomPos As Double = feat.GetBottomRefPosition.Item(2)
Dim TopPos As Double = feat.GetTopRefPosition.Item(2)

'Ermitteln ob die Absatzlaenge groesser 10mm ist:
If System.Math.Abs(TopPos - BottomPos) < (min_laenge - Tol) Then

    'Fehlermeldung und Markieren des Features:
    Dim strErrorMessage As String = "Die Spannstelle sollte laenger als " &
min_laenge & "mm und der Wellenabsatz mit dem groessten Durchmesser sein. Sonst sind
zusaetzhche Sonderkonstruktionen oder der Einsatz von Luenette und Reitstock
notwendig!" & "Aktuelle Absatzbreite: " & System.Math.Round(TopPos - BottomPos, 4) &
"mm."
    MarkFailedFeature(feature, strErrorMessage)
Else
    SetPassedInstance()
End If

```

Auslesen der
Referenzpositionen

Soll-Ist-Abgleich

Abb. 4-42: Funktionen zur Ermittlung der Flächenform und -größe

Sollten beispielsweise die Radienwerte voneinander abweichen, hat der größte Wellenabsatz und somit die potenzielle Spannstelle eine ungewünschte kegelige Form. Diese Information lässt sich als eine Fehlermeldung definieren und über die Funktion „MarkFailedFeature“ an die CAD-Plattform übergeben und visualisieren (siehe Abb. 4-43).

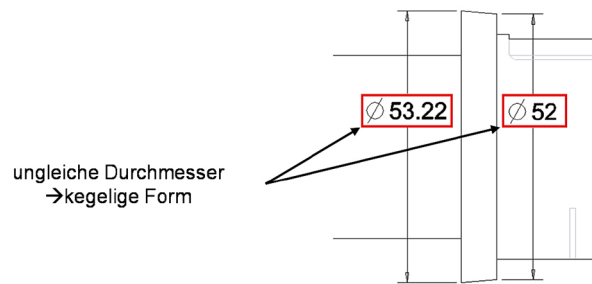


Abb. 4-43: Prüfung der Durchmesserdivergenz zur Ermittlung der Flächenform

Für das Beispiel einer Getriebewelle (vgl. auch Abb. 4-44) lassen sich weitere zerspanungsgerechte Prüfregeln in DPMPro implementieren, wie z. B.:

- Überprüfung der Standardwerte für Radien, Fasen, Bohrungs- und Gewindegrößen. Überprüfung der Einhaltung geforderter Bauteilabmaße mit zusätzlichen Hinweisen und Vorschlägen aus den Normen, Richtlinien oder festgelegten Standards an den Konstrukteur,
- Abfrage der Länge zu Durchmesser Verhältnisse (L/D) beim Bohren oder Fräsen mit Hinweisen an den Konstrukteur, dass beispielsweise bei schmalen Nuten Scheibenfräser genutzt werden sollten oder eine Änderung der Nutgeometrie notwendig ist,
- Prüfregel/Hinweis, dass das Bohren auf schrägen Flächen nur ab gewissen Größen z. B. $D=12$ mm und bis $3 \times D$ Tiefe möglich ist,
- Prüfregel/Hinweis, dass eine Drehgeometrie mit einem ebenen Grund durch Fräsen oder Bohren mit einem Vollbohrer realisierbar ist,
- Überprüfung von Ausläufen oder Gewindefreistichen bei Gewinden,
- Überprüfung der Einstichgeometrie und vor allem der Tiefe von Einstichen. Diese sollte nicht mehr als $6 \times$ Breite betragen. Tiefere Einstiche sind möglich, erfordern aber eine besondere Betrachtung und Rücksprache mit dem Fertigungsexperten,
- Überprüfung von Wandstärken der zu bearbeitenden Geometrie. Diese sollte die Grenze von 3 mm nicht unterschreiten. Dünnere Wandstärken sind möglich, erfordern aber eine besondere Betrachtung bzw. Rücksprache mit dem Fertigungsexperten,
- Überprüfung der Übergänge zwischen den Absätzen von Drehteilen mit Hinweisen auf scharfe Innenkanten und notwendige Eckenradien bzw. Freitische,
- Hinweise zum Einsatz einer Zentrierbohrung, eines Reitstockes oder Lünette bei Drehteilen. Wenn die Länge eines Absatzes mehr als $2 \times D$ ($L > 2 \times D$) beträgt, ist es empfehlenswert, eine Zentrierbohrung einzubringen und das Werkstück per Reitstock abzustützen. Bei einer Drehlänge von mehr als $3 \times D$ ist es empfehlenswert, das Werkstück per Lünette abzustützen.
- Überprüfung der Hinweise für den Konstrukteur, ob allgemeine Toleranzen, Oberflächenangaben, Form- und Lagetoleranzen im Teil vorhanden sind.

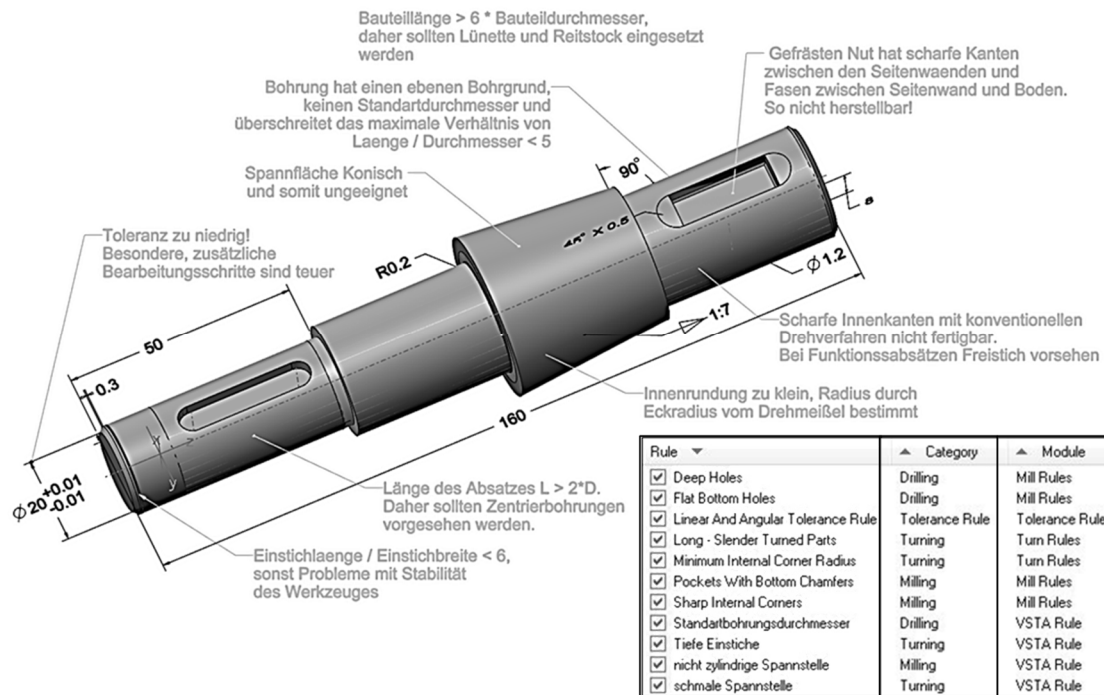


Abb. 4-44: Beispiel für eine zerspanungsgerechte Geometrieanalyse

5 CAD-Methodik zur Produktivitätssteigerung des CAD-CAM-Prozesses

5.1 Vorgehensmodell

Das Ziel der zu entwickelnden CAD-Methodik ist es, eine mögliche Vorgehensweise unter Einschluss von Strategien, Methoden, Werkzeugen und Hilfsmitteln aufzuzeigen, welche verwendet werden kann, um die Produktivitätssteigerung der CAD-CAM-Prozesse strategisch zu erreichen. Mit der Vorstellung des Vorgehensmodells wird die Verknüpfung der einzelnen CAD-Methoden, Strategien und CAD-basierten Tools für die Gestaltung spanend herzustellender Bauteile sowie die Übergabe der Daten an Simulationstools zur Abschätzung und Optimierung des Fertigungsaufwandes erläutert.

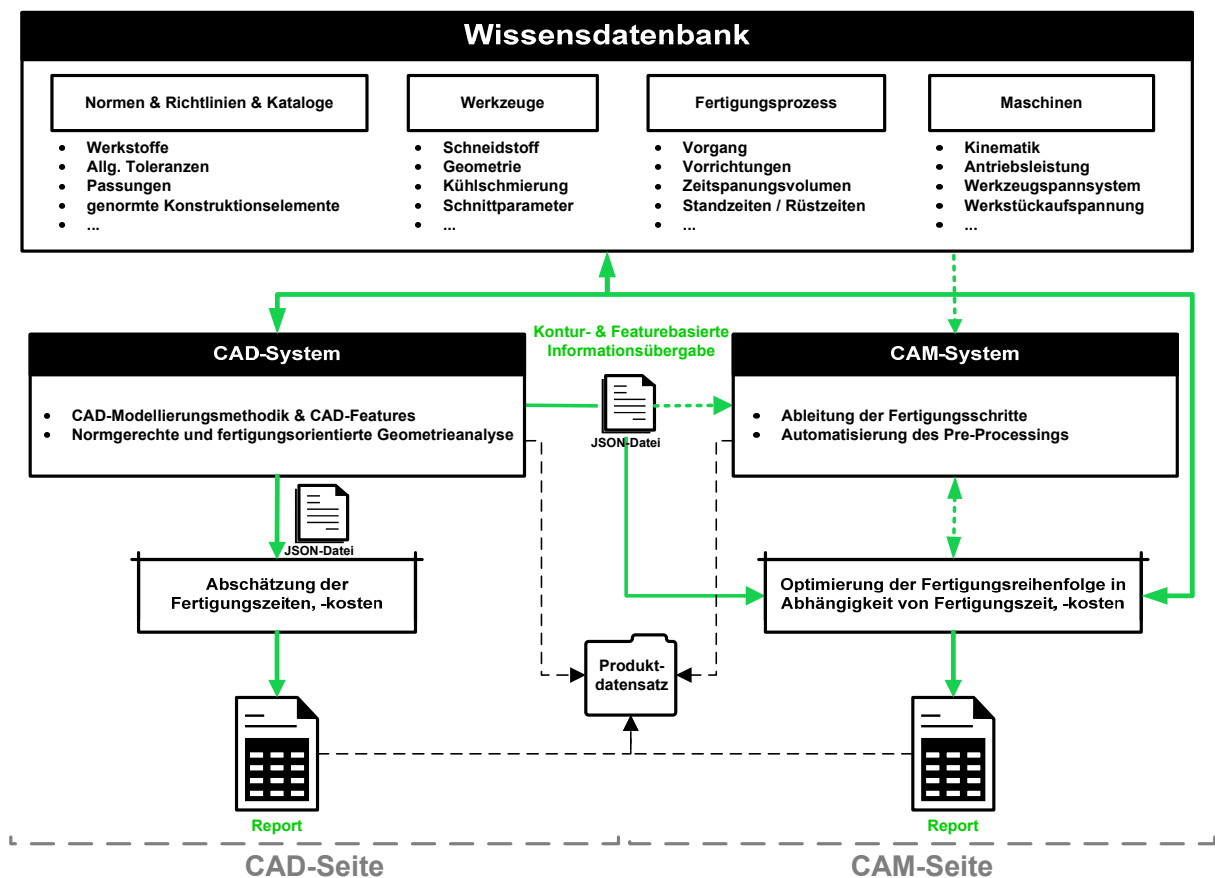


Abb. 5-1: Vorgehensmodell

In dem aufgestellten Vorgehensmodell wird grundsätzlich zwischen einer CAD- und CAM-Seite differenziert, welche durch eine zentrale und gemeinsame Wissensbasis (sog. Wissensdatenbank) mit Daten, Informationen und daraus generiertem Wissen versorgt werden. Dabei ist die Wissensdatenbank nicht zwingend als eine physikalische Datenbank mit verschiedenen Tabellen zu sehen, sondern als Verbund mehrerer eigenständiger Datenbanken, welche eine spezielle Wissensdomäne bilden. Zu den relevanten Datenbanken gehören u. a. Konstruktionsnormen, -richtlinien und -kataloge, Werkzeugdatenbanken, Fertigungsmaschinen, Daten und Informationen zum Fertigungsprozess. Der Zugriff auf die Wissensdatenbank geschieht über einen speziell entwickelten Webservice (unabhängig von der CAD- oder CAM-Seite), in dem nach einer Anfrage die Verknüpfung und Auswertung der Daten und Informationen stattfinden. Die ausgewerteten Daten und Informationen bilden dann das Wissen, welches auf der CAD-Seite direkt an das 3D-CAD-System, indirekt

(über eine JSON-Datei) an ein Abschätzungstool oder auf der CAM-Seite an das CAM-System und das Optimierungstool übergeben wird. Mithilfe der in der CAD-Umgebung implementierten Methoden soll es möglich sein, zerspanungskonforme CAD-Modelle durch den Konstrukteur aufzubauen und zu überprüfen. Um die notwendigen Herstellungszeiten und -kosten für die einzelnen Fertigungsschritte des konstruierten Bauteils ermitteln zu können, kann ein Abschätzungstool eingesetzt werden. Die dazu notwendige Schnittstelle zwischen dem CAD-System und dem Abschätzungstool ist in einem JSON-Format definiert. Diese Schnittstellendatei beinhaltet nicht nur die strukturiert aufgebauten Kontur- und Geometrieinformationen aus dem 3D-CAD-Modell, sondern auch alle dazugehörigen Parameter des Fertigungsprozesses und kann auch als Inputdatei für ein Optimierungstool auf der CAM-Seite eingesetzt werden.

Mithilfe eines geeigneten Abschätzungstools kann schon während der Konstruktion eine Kostenfrüherkennung erfolgen, da der Zeitbedarf aller einzelnen Arbeitsgänge (Tasks) vom System ermittelt werden kann und damit Arbeitsgänge mit hohen assoziierten Kosten bzw. Fertigungszeiten aufgezeigt werden. Zudem können einzelne Fertigungsvoraussetzungen überprüft werden. In der Optimierungssapplikation sollen zusätzlich die auftretenden Fertigungsschritte, Tasks und Prozessparameter hinsichtlich der Zielgrößen und festgelegten Gütefunktionen untersucht und optimiert werden können.

5.2 CAD-Applikation und CAD-Umgebung mit implementierten Methoden

5.2.1 CAD-Applikation zur Gestaltung schraubgefräster Bauteile

Wie bereits im Abschnitt 4.1 beschrieben führt die Lösung des Gestaltungsproblems zerspanungsorientierter Geometriemodelle über die Flächenmodellierung. Die realisierten analytischen Kurvenbeschreibungsmethoden kombiniert mit Flächenmodellierungsmethoden ermöglichen die Gestaltung zerspanungskonformer Features für unterschiedliche Werkzeuggeometrie in den 3D-CAD-Systemen. Durch die Möglichkeit der Generierung neuer, benutzerdefinierter Features (UDF) werden die einzelnen Modellierungsschritte zusammengefasst und in einer Datenbank für zukünftige Anwendungen bereitgestellt. Um eine fertigungskonforme und vor allem fehlerfreie Modellierung wendelartiger Nutgeometrien in anderen 3D-CAD-Systemen wie CATIA V5R19 und SolidWorks2010 zu ermöglichen, ist eine spezielle Anwendungsapplikation entwickelt worden. Hierzu wurden die API-Schnittstellen der 3D-CAD-Systeme verwendet, um ein Anwendungsprogramm in Visual Studio 2010 zu entwickeln (siehe Abb. 5-2).

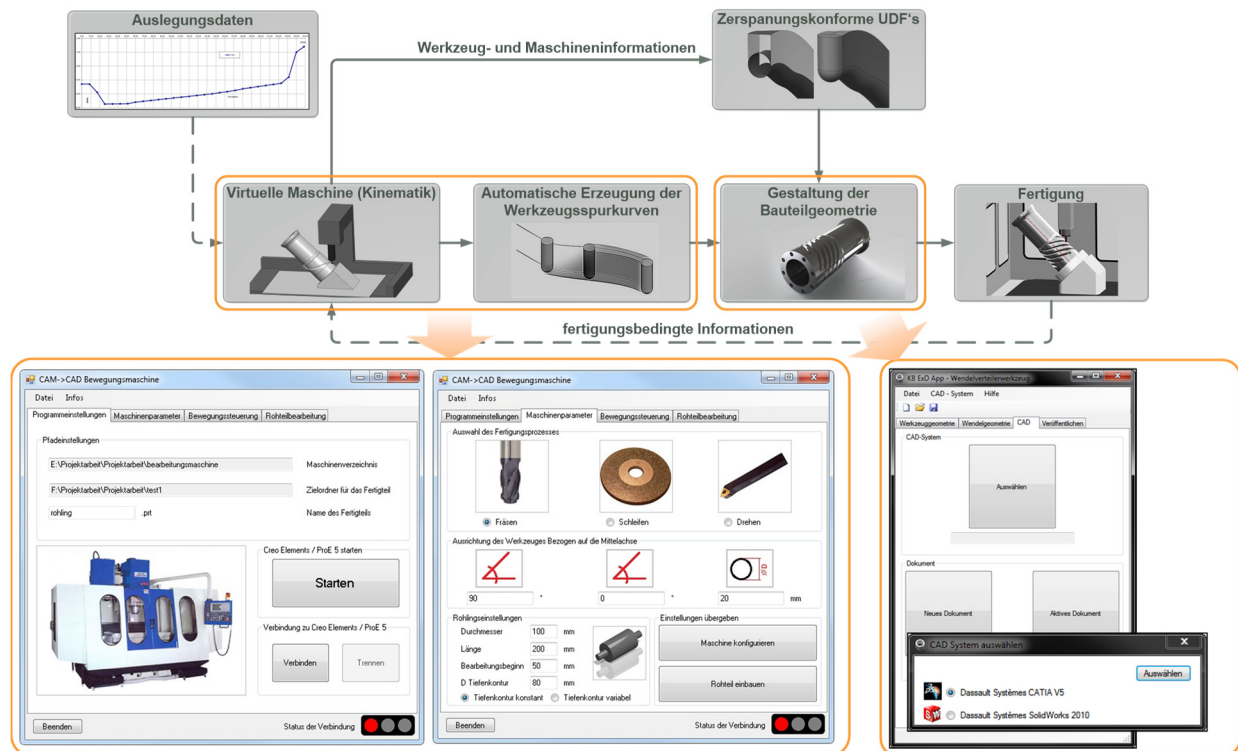


Abb. 5-2: CAD-Applikation zur Gestaltung zerspanungsorientierter Geometrie

Mit dieser Applikation ist es möglich, zum Beispiel schraubgefräste Wendelkanäle fertigungsgerecht zu gestalten. Des Weiteren lassen sich auch die 3D-CAD-Modelle dimensionieren und simulationsgerecht aufbauen (vgl. Abb. 5-3). Dabei ist die Generierung der Werkzeugverfahrwege über den analytischen oder kinematischen Ansatz möglich. Für den kinematischen Ansatz wurde ein Unterprogramm in Verbindung mit dem CAD-System Creo Elements/Pro 5.0 entwickelt, das dem Anwender erlaubt, eine virtuelle Fertigungsmaschine mit allen relevanten Parametern zu konfigurieren.

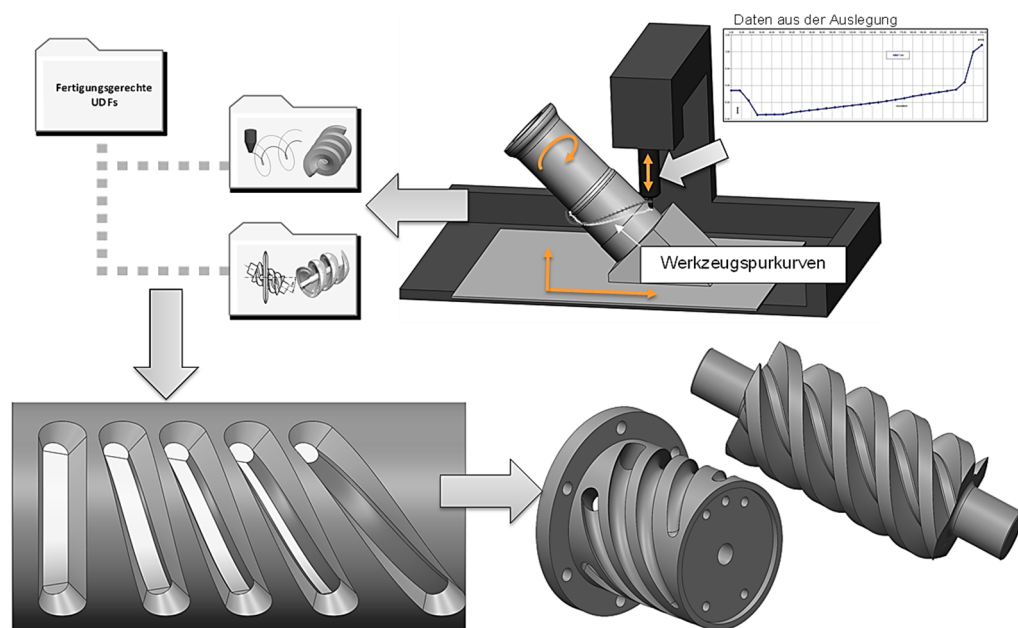


Abb. 5-3: Abbildung der Modellierungsmethodik in der CAD-Applikation

Durch eine Implementierung der spanenden Bearbeitungsmethoden wie Drehen, Schraubfräsen und Schleifen wird dem Benutzer zusätzlich eine Bewegungsanalyse (MKS) in Abhängigkeit von der Auswahl der Werkzeugparameter, der Lage des Werkzeugs zur Werkstückachse und weiterer bearbeitungsspezifischer Parameter ermöglicht. Dabei ist es möglich, für das Schraubfräsen zwischen dem Generierungs- und Überprüfungsmodus der Werkzeugverfahrwege und der -bewegungshüllen zu unterscheiden. Des Weiteren wurde die entwickelte Modellierungsmethodik zur Gestaltung wendelartiger Nuten in die CAD-Applikation in Form von werkzeuggeometrieabhängigen Fertigungsfeatures implementiert.

Für die weiteren erwähnten Fertigungsmethoden, wie z. B. Schleifen, können zwecks Geometrieüberprüfungen die werkzeug- und maschinenabhängigen Bewegungshüllen als trianguliertes Volumen generiert werden.

5.2.2 CAD-Umgebung mit normgerechten und fertigungsorientierten Features

Um dem Konstrukteur eine möglichst komplette funktions- und fertigungsorientierte Ausgestaltung rotationssymmetrischer Bauteile, wie die erwähnten Wendelverteilerwerkzeuge, Zylinderschnecken oder allg. Antriebswellen, zu ermöglichen, wurden ergänzend zu der CAD-Applikation und der darauf basierenden Modellierungsmethodik weitere standardisierte und normbasierte Konstruktionselemente entwickelt und zur Verfügung gestellt. Dazu gehören Konstruktionselemente wie z. B.: Zentrierbohrungen, Freistiche, Gewindefreistiche, Gewindeausläufe, Langlöcher, Ringnuten oder Passfedernuten. Diese Features, welche Fertigungsaspekte in den Vordergrund der Konstruktion rücken, werden in einer speziell entwickelten CAD-Umgebung des 3D-CAD-Systems Creo 2.0 zur Verfügung gestellt.

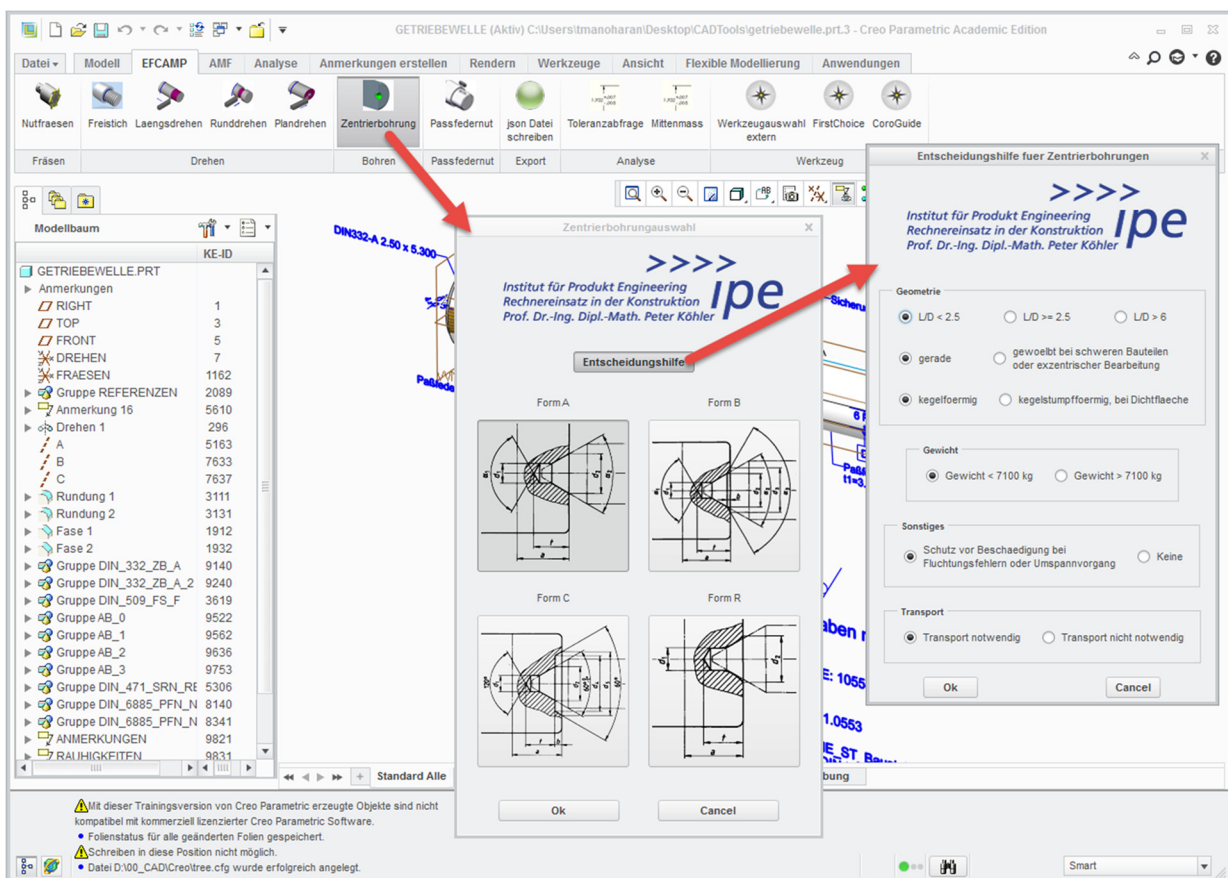


Abb. 5-4: CAD-Umgebung in Creo 2.0 mit integrierten fertigungsorientierten Features

Durch die konzipierten Features wird der Konstrukteur nicht nur bei der norm- und fertigungsorientierten Gestaltung und Dimensionierung unterstützt, sondern auch bei der Entscheidung über die Notwendigkeit des Features in dem zu konstruierenden Bauteil. Dies wird am Beispiel der implementierten Entscheidungshilfe zur Auswahl der richtigen Zentrierbohrungsform deutlich (vgl. Abb. 5-4).

Beim Aufruf des UDFs wird automatisch vom System eine Ausprägung der Zentrierbohrung ermittelt und in der GUI dem Benutzer durch eine Hervorhebung vorgeschlagen. Die dazu notwendigen Informationen, wie das Verhältnis Länge zu Durchmesser der Welle oder auch die Masseneigenschaften (Gewicht), werden aus der Geometrie des 3D-CAD-Modells abgeleitet. Weiterführende Informationen können dann anschließend durch den Konstrukteur in die GUI eingegeben werden. Das System prüft ferner die Eingaben anhand der Entscheidungshilfen und schlägt dem Benutzer die für den Einsatz passende Zentrierbohrung vor und wählt diese für den Einbau aus. Der Benutzer hat dennoch die Möglichkeit diese Entscheidung zu ignorieren und eine eigene Form auszuwählen.

5.2.3 Normgerechte und fertigungsorientierte 3D-CAD-Modellanalyse

Zur Überprüfung der 3D-CAD-Modelle hinsichtlich ihrer Fertigungsgerechtigkeit bezogen auf die konventionellen Fertigungsschritte, wie Drehen, Bohren und Fräsen, wurde an das 3D-CAD-System eine Applikation des DFMPro-Tools angebunden. Durch die Möglichkeit zur Programmierung von individualisierten Custom-Checks zur Fertigbarkeitsanalyse der 3D-CAD-Modelle wurden die standardmäßig enthaltenen Sammlungen von vordefinierten Prüfungen für die zerspanenden Fertigungsoperationen um spezielle Prüfregele ergänzt. Dazu zählen u. a. Regeln zur Überprüfung von:

- standardisierten Radien- und Verrundungswerten,
- Bohrungen mit senkrechten Bohreintrittsflächen und/oder mit ebenem Bohrgrund,
- optimaler Gewinde- und Anschnittlänge bei Bohrungen,
- optimalem Längen-Tiefen-Verhältnis für Bohrungen auf Basis vorhandener Bohrwerkzeuge,
- minimalen Wandstärken bei Bohrungen und Taschen/Nuten,
- optimalem Längen-Tiefen-Verhältnis von Taschen und Nuten auf Basis von Fräswerkzeugen,
- der Gestaltung von Passfeder-/Keilnuten (Form und Symmetrie),
- Vorhandensein von Werkzeugausläufen bei Drehbearbeitungsschritten (Verrundungen von Ecken/Kanten bei Wellenabsätzen),
- Einstichdurchmesser Verhältnis bei Drehteilen,
- allgemeinen Toleranzwertbereichen für realisierte Fertigungsfeatures.

Mithilfe des DFMPro-Tools und den entwickelten Custom-Checks lassen sich nicht nur die 3D-CAD-Modelle analysieren, deren Bauteilgeometrie auf den entwickelten fertigungsorientierten Features basiert, sondern jede über eine neutrale Schnittstelle (STEP, IGES, JT etc.) importierte Geometrie. Die Abb. 5-5 zeigt eine Getriebewelle, welche über eine neutrale Schnittstelle importiert wurde und bezüglich der Normgerechtigkeit und Fertigungsorientiertheit mit den entwickelten Prüfregele analysiert wurde. Die Ergebnisse der Analyse wurden in dem 3D-CAD-System zusätzlich mit den Anmerkung-KEs verknüpft, um die Aufmerksamkeit des Konstrukteurs auf die möglichen Fehler zu richten.

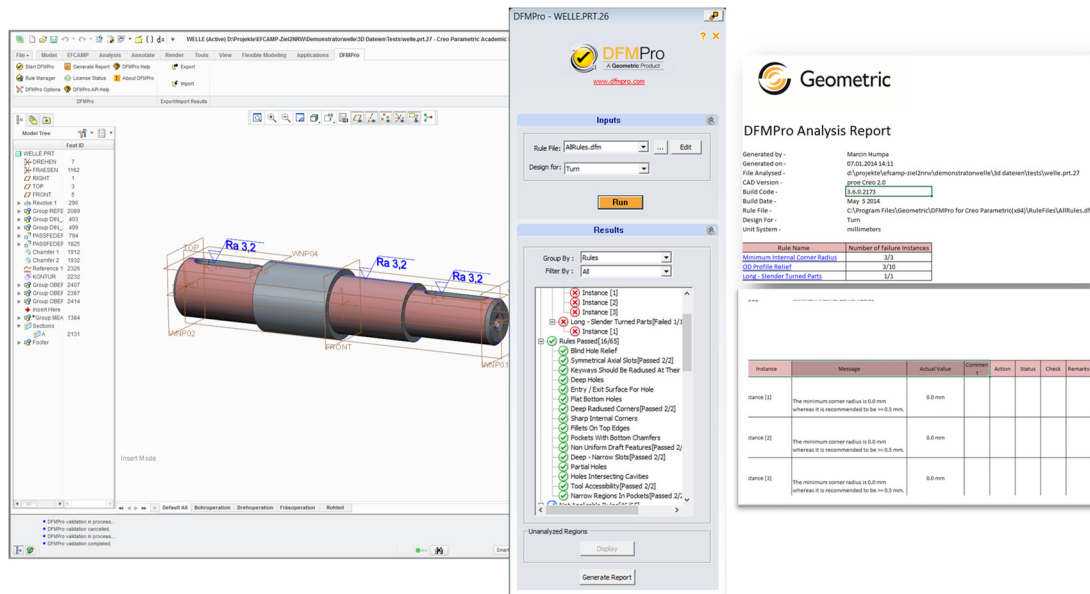


Abb. 5-5: Fertigungsgerechte Geometrieanalyse

5.3 Wissensdatenbank und Webservice-Dienst

Um die Prozesskette Konstruktion-Fertigung durchgängig zu gestalten und die konstruktionsbegleitende Abschätzung der Fertigungszeiten, welche für die Kostenabschätzung ausschlaggebend sind, zu ermöglichen, wird die in Abschnitt 4.3 vorgestellte Methodik zur Einbindung technologischer Fertigungsinformationen in den Konstruktionsprozess angewandt. Die in der Abb. 5-6 dargestellte Lösung stellt einen entwickelten Webservice dar, der aus der CAD-Umgebung, aber auch über andere beliebige Applikationen und Webbrowser erreichbar ist.

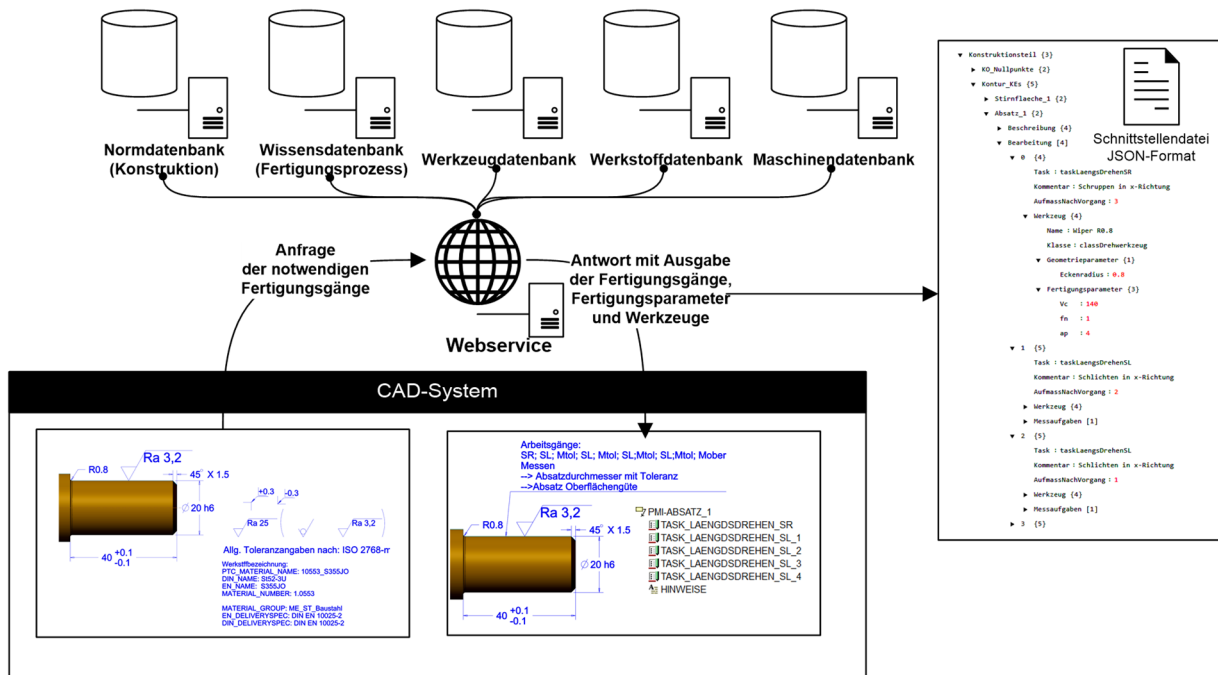


Abb. 5-6: Webservice zur Einbindung technologischer Fertigungsinformationen

Der Vorteil des entwickelten Webservice-Dienstes ist, dass der Anwender (Konstrukteur/Arbeitsvorbereiter) und die Anbieter der Informationen in Form von verschiedenen, ortsungebundenen Datenbanken lose gekoppelt sind und über definierte Schnittstellen kommunizieren. Dadurch bleiben Details der Implementierung des Webservices verborgen. Somit stellt das Webservice den Kern der Wissensbereitstellung dar.

Die technologischen Fertigungsinformationen für einen ausgewählten Geometriebereich (hier ein Wellenabsatz) werden über den Webservice ermittelt, indem ein Nutzer eine Suchanfrage mit den Schlüsselparametern (Werkstoff, allg. Toleranz, Wellendurchmesser und -toleranz, globale/lokale Oberflächengüte, Eckenradius) feuert. Der Webservice, welcher eine logische Beschreibung der Zusammenhänge und Angaben über die Aufenthaltsorte sämtlicher Informationen enthält, interpretiert diese Anfrage und die Zusammenhänge und schickt gezielt weitere Anfragen an die einzelnen Anbieter (hier Datenbanken) und wertet anschließend die erhaltenen Daten und Informationen aus. Die Inhalte der Antwort stellen alle für die Fertigung des Wellenabsatzes notwendigen Informationen in Form von Fertigungsschritten, Werkzeugen und Schnittwerten dar. Diese Informationen werden direkt an das CAD-System weitergeleitet und in Form von Fertigungsschablonen an die Geometrie des CAD-Modells eingebunden. Zusätzlich werden die Fertigungsinformationen in einer Schnittstellen-datei im JSON-Format festgehalten. Da diese Datei auch als Inputfile für das Abschätzungs- und Optimierungstool genutzt wird (vgl. auch Abb. 5-1), beinhaltet diese auch konturbeschreibende Geometrieinformationen. Diese werden in der NC-Syntax nach DIN-Norm [DIN66025-1] automatisch während einer Webservice-Anfrage aus dem CAD-System ausgeschrieben und nach der Auswertung des Webservices um die technologische Fertigungsinformationen ergänzt. Das Schema der fertigungsorientierten Geometrieauswertung, Entscheidung und Zuordnung von Arbeitsschritten und Tasks, welche innerhalb des Webservices geschehen, ist beispielhaft für einen Wellenabsatz in der Abb. 5-7 dargestellt.

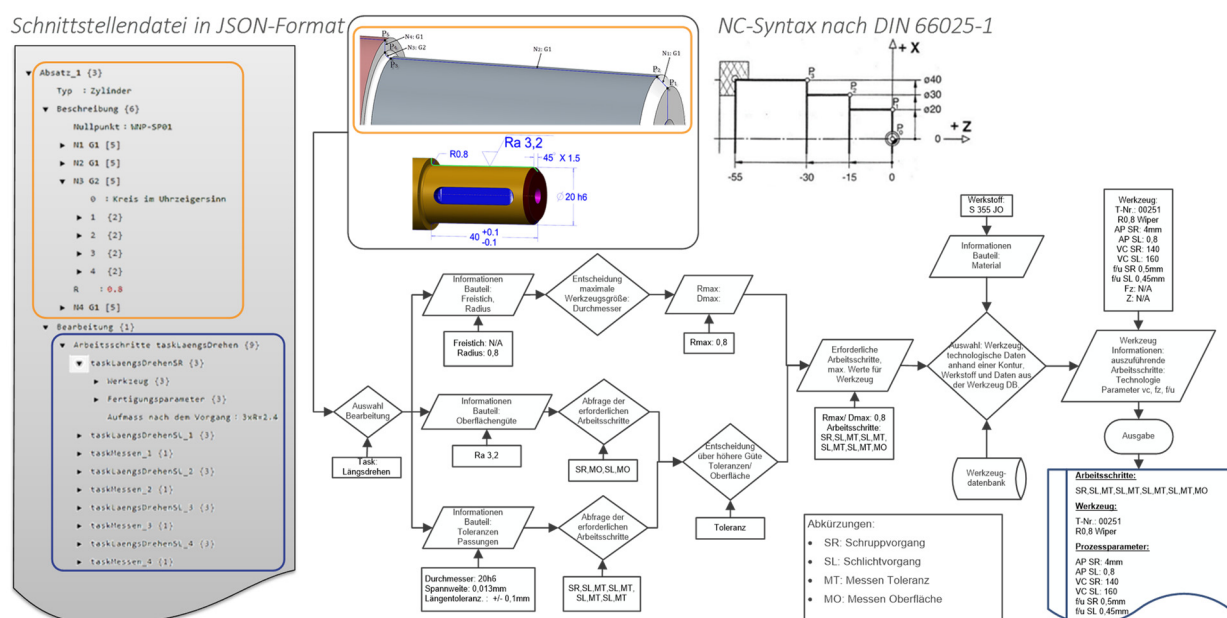


Abb. 5-7: Schnittstellendatei im JSON-Format

5.4 CAD-CAM-Kopplung auf Basis fertigungsorientierter Features

Die vorgestellten Methoden zum zerspanungsorientierten Geometrieaufbau von 3D-CAD-Modellen und zur Einbindung technologischer Fertigungsinformationen bilden die grundlegende Basis der CAD-CAM-Kopplung auf Basis fertigungsorientierter Features. Die Absicherung fertigungskonformer 3D-CAD-Modelle schon während des Konstruktionsprozesses vereinfacht den CAD-CAM-Prozess.

Durch die Nutzung der neuen höherwertigen und fertigungsorientierten Features zusammen mit einer vollständig integrierten CAD-CAM-Lösung (wie z. B. Creo 2.0 als CAD-System und Creo-NC als CAM-System) lassen sich anhand der featurebasierten Informationen einzelne Fertigungsfolgen automatisch aus dem CAD-Modell extrahieren (siehe Abb. 5-8).

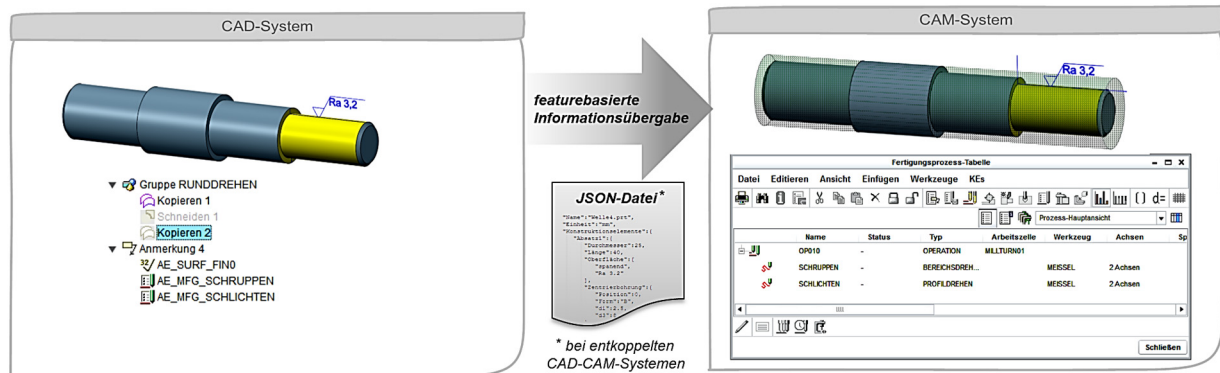


Abb. 5-8: Featurebasierte Informationsübergabe

Für den Fall einer voneinander entkoppelten Softwarelandschaft der CAD- und CAM-Systeme müssen die Geometriedaten in ein neutrales Austauschformat (STEP, JT, IGES, ...) transferiert werden. Die dazugehörigen Fertigungsinformationen werden über die Schnittstellendatei in das JSON-Format übertragen. Lässt sich die JSON-Datei über geeignete Parser zusammen mit der Geometriedatei in ein CAM-System einlesen, können auch in den CAM-Systemen die featurebasierten Informationen ausgelesen und Fertigungsschritte extrahiert werden. Somit könnte in der Zukunft auf die Zeichnungsableitung als Mittel zur Kommunikation zwischen CAD und CAM verzichtet werden.

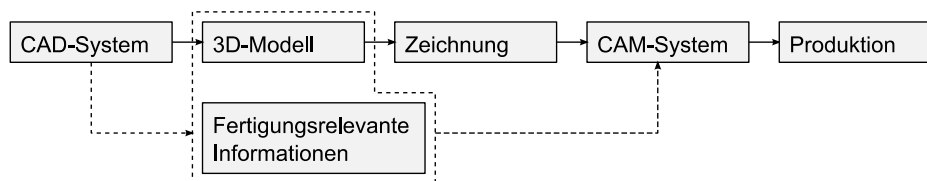


Abb. 5-9: Einbindung von Fertigungsinformationen

Ein Beispiel für die dazu notwendige Datenstruktur eines CAD-Templates ist in der Abb. 5-10 abgebildet.

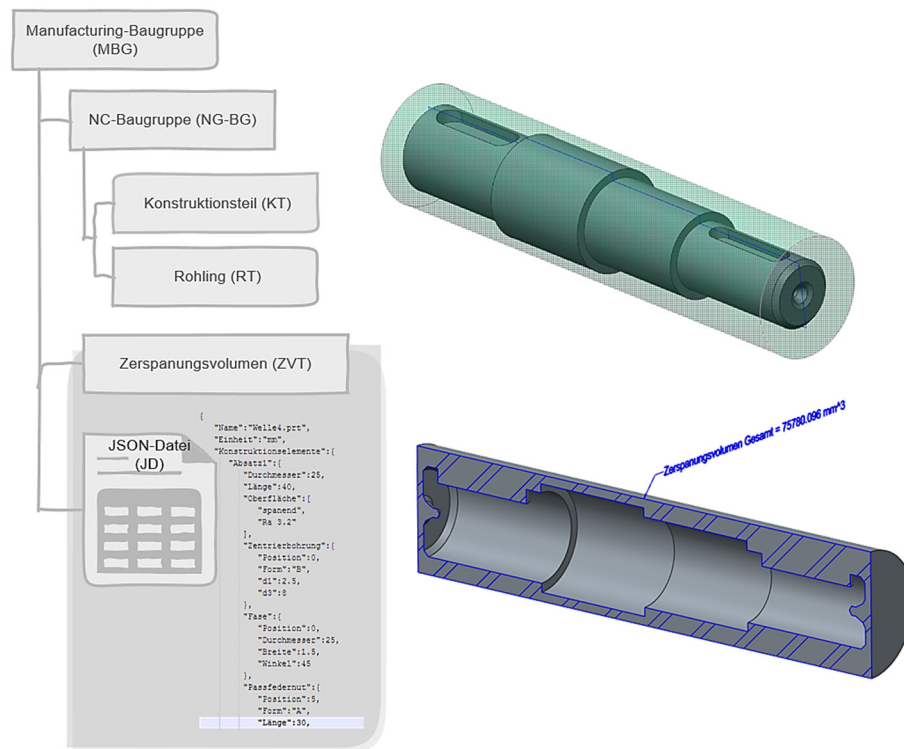


Abb. 5-10: Datenstruktur des CAD-Templates

Sie umfasst folgende Überlegungen:

- die Fertigungsbaugruppe (MBG) stellt das Grundgerüst für die NC-Programmierung und enthält die NC-Baugruppe (Konstruktionsteil (KT) und Rohteil (RT)), das Zerspanungsvolumenteil (ZVT) und die JSON-Datei (JD)
- die NC-Baugruppe (NC-BG) besteht aus dem zu konstruierenden Bauteil (KT) hier „Welle“ und einem Rohteil (RT)
- zur Gestaltung des KT soll als Vorlage das Startmodell verwendet werden,
- RT wird automatisch abgeleitet, kann aber mit zusätzlichen Aufmaßen vorgesehen werden,
- Zerspanungsvolumen (ZVT) beinhaltet das gesamte Zerspanungsvolumen,
- die JSON-Datei (JD) beinhaltet geometriebezogene Informationen aus dem CAD-System und dient als Input für eine Kosten-/Zeitschätzung. Diese Datei kann beliebig manipuliert und um weitere technologische Informationen ergänzt werden

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Vision der Zukunft, welche sich unter dem Begriff Industrie 4.0 und Internet der Dinge verbirgt und wo Daten, Informationen und Wissen miteinander vernetzt werden und somit auch die Prozesse intelligenter, flexibler, schneller, aber auch die Produkte individueller und ressourceneffizienter gestaltet und hergestellt werden sollen, fordert zu einer Reflexion der heutigen Prozessabläufe auf. Die Frage ist, was muss heute und in der nahen Zukunft geschehen, um die langfristigen Ziele zu erreichen und vor allem wie soll es geschehen? Die Antworten sollen eine richtungsgebende Orientierung für die anzustoßenden Veränderungen liefern. Die Globalisierung der Märkte und weltweit verteilte Entwicklungsabteilungen und somit die Komplexität der Prozesse machen es erforderlich, die Bereiche des Produktentstehungsprozesses strategisch neu zu analysieren und zu überdenken. Für eine dauerhafte Vernetzungs- und Kommunikationsmöglichkeit zwischen Prozessschritten, Systemen oder Geräten und zwar über den gesamten Lebenszyklus hinweg müssen die interdisziplinären Produktentstehungsmethoden sowie die Techniken für den Daten-, Informations- und Wissensaustausch auch einem Wandel in Richtung Smart Engineering unterzogen werden. Die Herausforderung an dieser Stelle ist, neue Möglichkeiten und Methoden zur Verbesserung der Prozessabläufe aufzuzeigen, um die bereits vorhandenen organisatorischen Konzepte und Ansätze zur Prozessoptimierung, die CAx-Technologien, die IT-Lösungen und die PLM-Technologie strategisch sinnvoll zu verknüpfen und nutzbringend umzusetzen.

Diesbezüglich wurde im Rahmen dieser Arbeit die Produktivitätssteigerung in der Prozesskette Konstruktion-Fertigung mit dem Schwerpunkt der CAD-CAM-Prozesskette im Kontext konventioneller Fertigung betrachtet. Dabei wurde die Beeinflussung der Produktivität als eine strategische Aufgabe angesehen mit dem Hauptziel, die Ressourcen in Form von Daten, Informationen und Wissen und dazugehörigen Methoden, Strategien und Technologien schöpferisch-produktiv einsetzen zu können. Das Ergebnis der Betrachtung stellt eine CAD-Methodik dar, zu deren Entwicklung folgende Aspekte betrachtet worden sind:

- die 3D-Produktmodellierungsmethoden zur Gestaltung normgerechter und fertigungsorientierter 3D-CAD-Modelle,
- geeignete CAD-Methoden und Hilfsmittel innerhalb geeigneter Softwaretools zur Unterstützung der Modellanalyse und Modelloptimierung hinsichtlich der Norm- und Fertigungsgerechtigkeit,
- Strategie und Methoden zur Integration der Fertigungsinformationen in den Konstruktionsprozess,
- Strategie und Methoden zur durchgängigen CAD-CAM-Kopplung und damit zur Beschleunigung der CAD-CAM-Prozessabläufe,
- Strategie und Hilfsmittel zur verlustfreien Datenübergabe an weitere Methoden oder Systeme (wie z. B. Kostenabschätzungs- und Kostenkalkulationsmethoden oder Optimierungssysteme) über eine definierte Schnittstelle,
- Strategie und IT-Werkzeuge zum gemeinsamen Zugriff auf alle organisationsinternen und -übergreifenden sowie global verteilten Norm- und Fertigungsinformationen.

Um den Stand der Technik besser zu beleuchten, die Schwachstellen zu identifizieren und Verbesserungspotenziale aufzudecken, wurde in dieser Arbeit der Versuch einer möglichst breiten und ganzheitlichen Betrachtung und Analyse des heutigen CAD-CAM-Prozesses in Bezug auf die konventionellen Fertigungsverfahren (Drehen, Fräsen und Bohren) vorgenommen. Diesbezüglich wurden

kurz die wichtigsten Dreh-, Fräs- und Bohrverfahren aus dem Bereich der konventionellen Fertigung mit den dazugehörigen Werkzeugen, Prozessparametern und dem Fertigungswissen dargelegt. Bei der Betrachtung des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses im Hinblick auf die Herstellkosten wurden die in der Literatur vorzufindenden herstellkostenbeeinflussenden Merkmale sowie die Notwendigkeit der Kostentransparenz und -verantwortung innerhalb der Prozesskette Konstruktion-Fertigung identifiziert. Darauffolgend wurde die konstruktionsbegleitende Kalkulation (KBK) als methodisches Mittel zur Kostenanalyse und -kontrolle und die Bedeutung der norm- und fertigungsgerechten Konstruktion in allen Phasen des Konstruktionsprozesses dargelegt.

Hinsichtlich der strategischen Möglichkeiten zur Beeinflussung der Produktivität wurden die organisatorischen und methodischen Aspekte zur Unterstützung der Kommunikation und Zusammenarbeit innerhalb global verteilter Produktentstehungsprozesse verschiedener Disziplinen erfasst. Hierzu wurde u. a. die strategische Bedeutung des Wissens- und Informationsmanagements, PLMs, SysLMs als Mittel zur Beherrschung der Komplexität der IT-Welt sowie die Zweckdienlichkeit der 3D-Produktmodellierung in verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus erörtert.

Die heute in den CAD- und CAM-Prozessen genutzten bzw. zur Verfügung stehenden Technologien wie die KBE-, Feature-Technologie mit den dazugehörigen Methoden der 3D-Modellierung, der Feature-Erkennung und -Transformation sowie den Methoden zur Sicherung der geforderten Datenqualität der 3D-CAD-Modelle stellen einen wichtigen Betrachtungspunkt hinsichtlich der in der Arbeit gestellten Ziele der Entwicklung einer CAD-Methodik dar. Dazu gehört auch die Diskussion des Themas der rechnergestützten Fertigung mit den verschiedenen Möglichkeiten der CAD-CAM-Kopplung.

In Bezug auf die Bereitstellung und den Austausch von Daten, Informationen und Wissen über die Abteilungs- und Unternehmensgrenzen wurden die Technologien und Methoden des Daten- und Informationsmanagements betrachtet. Dazu gehörten insbesondere die verschiedenen Schnittstelleneigenschaften und Datenaustauschformate innerhalb der CAD-CAM-Prozesskette sowie die Grundlagen und Eigenschaften rationaler Datenbanksysteme, welche eine Gestaltungsvoraussetzung für service-orientierte Architekturen und im Speziellen eines Webservices bilden.

Den in der Literatur vorzufindenden Sichten auf das breite Themenspektrum und dem identifizierten Handlungsbedarf folgte eine detaillierte Betrachtung ausgewählter Aspekte des CAD-CAM-Prozesses anhand eines vordefinierten Bauteilspektrums. Dazu gehören eine Welle aus dem Bereiche der klassischen Maschinenelemente, Zylinderschnecken und ein Wendelverteilerwerkzeug aus dem Bereich der Kunststoffverarbeitung. Die Kernpunkte der Analyse bildeten u. a.:

- die Betrachtung der CAD-Features und der Modellierungsmethodik im Hinblick auf die spanende Fertigung mit geometrisch bestimmter Schneide und die zerspanungskonforme Geometriegestaltung der 3D-CAD-Modelle,
- die Betrachtung der CAD- und CAM-Features im Hinblick auf die CAD-CAM-Kopplung sowie Norm- und Fertigungsgerechtigkeit,
- die Betrachtung der Möglichkeiten zu fertigungsorientierten Bauteilanalysen der 3D-CAD-Modelle mit den Softwaretools ModelCHECK und DFMPro,
- die Betrachtung des 3D-CAD-Produktmodellierungsprozesses aus der Sicht des methodischen Konstruierens und der Einbeziehung der KBK-Methoden,
- die Betrachtung der Verfügbarkeit der Daten, Informationen und des Wissens sowie ihre Austauschmöglichkeiten innerhalb der CAD-CAM-Prozesskette.

Die Ergebnisse aus der Analyse verdeutlichen den Handlungsbedarf bei fertigungstechnischen Herausforderungen während des 3D-Produktmodellierungsprozesses im Kontext der konventionellen Fertigungsverfahren. Die Evaluierung der 3D-Produktmodellierungsmethoden zeigte, dass die CAD-Methoden und -Features, welche den Konstrukteur beim Aufbau normgerechter und fertigungsorientierter 3D-CAD-Modelle unterstützen sollen, von besonderer Bedeutung sind, um nicht nur der Funktion des geplanten Produktes, sondern auch den Aspekten der wirtschaftlichen Fertigung gerecht zu werden. Hierzu sind insbesondere zwei Szenarien hervorzuheben. Zum einen eine von vornherein featurebasierte Modellierung mithilfe von normgerechten und fertigungskonformen CAD-Features und zum anderen die Unterstützung der 3D-CAD-Modellanalyse und -Modelloptimierung hinsichtlich der Fertigungsgerechtigkeit. Eine Entwicklung neuer und die Ergänzung bestehender CAD-Features, -Methoden, und ihre Implementierung in die 3D-CAD-Umgebung sollen dazu beitragen, immer mehr bewusste und herstellkostenbeeinflussende Entscheidungen schon während der Entwicklungs- und Konstruktionsphase treffen zu können. Um das zu realisieren ist nicht nur eine Kopplung der Geometriedaten mit den quantitativen Herstellkosten/-zeiten basierenden KBK-Verfahren notwendig, sondern eine Strategie zur Transformation, Formalisierung und Bereitstellung des Fertigungswissens sowie ihre Anbindung an den Konstruktionsprozess notwendig. Hierbei soll es jedoch nicht das Ziel der reinen Übergabe der 3D-CAD-Daten in ein entsprechendes Kalkulationsprogramm oder CAM-System sein, sondern eine durchgängige CAD-CAM-Kopplung, die zur Beschleunigung der Prozessabläufe und Sicherung der Datenqualität führt, angestrebt werden.

Die identifizierten Herausforderungen aus der Analyse der einzelnen Aspekte des CAD-CAM-Prozesses führten zur Konzipierung und Entwicklung einzelner wissensbasierter, norm- und fertigungsorientierter CAD-Methoden. Im Hinblick auf die Geometriegestaltung schraubgefräster Bauteile in den CAD-Systemen wurde eine neue Modellierungsmethodik entwickelt, mit der bewiesen worden ist, dass eine fehlerfreie Abbildung der Geometrie des Schraubfräsens möglich ist. Hierzu wurden analytische und Kinematik-basierte Kurvenbeschreibungsmethoden entwickelt, welche zusammen mit flächenbasierten Operationen die Gestaltung der Bewegungshüllen rotationssymmetrischer Fräswerkzeuge in den CAD-Systemen ermöglicht. Die entwickelten Ansätze und Methoden stellen eine grundsätzliche CAD-System-unabhängige Vorgehensweise dar, welche einer kritischen Beurteilung und Anwendbarkeitsdiskussion unterzogen wurden.

Um dem Konstrukteur eine möglichst komplette funktions- und fertigungsorientierte Ausgestaltung rotationssymmetrischer Bauteile zu ermöglichen, wurden auch weitere normbasierte und zerspanungsorientierte Konstruktionselemente in Form von UDFs exemplarisch entworfen und umgesetzt. Dazu gehören z. B. Zentrierbohrungen, Freistiche, Gewindefreistiche, Gewindeausläufe, Langlöcher, Ringnuten und Passfedernuten. Diesbezüglich wurde eine Methodik für den Featureaufbau mit der dort zu enthaltenden Semantik festgelegt, welche auf den Zusammenhängen aus den verschiedenen DIN-Normen basiert. Durch die Anbindung konzipierter Entscheidungshilfen an das Integrationskonzept der Features in die 3D-CAD-Umgebung soll der Konstrukteur somit nicht nur bei der Dimensionierung t , sondern auch bei den Entscheidungen über die Notwendigkeit des Features in dem zu konstruierenden Bauteil unterstützt werden.

Im Hinblick auf die Durchgängigkeit der CAD-CAM-Kopplung und die Beschleunigung der Prozessabläufe wurde eine Strategie zur Einbindung technologischer Fertigungsinformationen an die CAD-Daten entwickelt. Da meistens die Angaben über die Toleranzen und/oder Oberflächengüte eines Bauteils oder -bereiches aus der Funktionssicht der Gesamtkonstruktion festgelegt werden, werden durch diese Angaben schon während des Konstruktionsprozesses (oft unbewusst) einige Fertigungsschritte festgelegt, um diese zu erfüllen. Diesbezüglich wurde ein Konzept zur Kopplung des Konstruktions- und Fertigungswissens aufgestellt. Die Informationen über die Schrapp- und anschließende Schlichtvorgänge werden in der Abhängigkeit von der Dreh- oder Frästeilgeometrie mit

den notwendigen Werkzeugen und Prozessparametern wie Schnittgeschwindigkeit und Vorschub gekoppelt und an die Geometrie des Bauteils eingebunden.

Bezüglich der Sicherung der Datenqualität und der Unterstützung der normgerechten und fertigungsorientierten 3D-CAD-Modellanalyse sowie der Modelloptimierung hinsichtlich der Fertigungsgerechtigkeit wurden mittels des Softwaretools DFMPPro und am Beispiel einer Welle die Möglichkeiten zur Integration zerspanungsgerechter Prüffunktionen gezeigt. Die grundlegende Basis zur Formulierung und Integration der Prüffregeln bildeten vor allem die DIN-Normen mit ihren Konstruktionsstandards sowie heuristische Regeln und die Gut-Schlecht-Beispiele der qualitativen KBK-Methoden. Somit wurde auch gezeigt, dass durch entsprechende Schritte der Wissenstransformation, -formalisierung und des -transfers und durch die Nutzung geeigneter CAD-Funktionalitäten die Einbeziehung der KBK-Methoden in den 3D-Produktmodellierungsprozess möglich ist. Jedoch ist für eine spätere Anwendbarkeit der quantitativen Methoden auf das 3D-Produktmodell als Analysehilfsmittel eine weitere Strategie vonnöten.

Um dem deklarierten Ziel der Steigerung der technischen Produktivität in der Prozesskette Konstruktion-Fertigung im Kontext der konventionellen Fertigung durch die Entwicklung und Nutzung einer geeigneten CAD-Methodik gerecht zu werden, wurde ein Vorgehensmodell vorgeschlagen. Dieser stützt sich auf die entwickelten, wissensbasierten CAD-Methoden und zeigt eine Verknüpfungsstrategie mit der dazu konzipierten IT-Strategie und der Schnittstellenfunktionalität.

Es wurde gezeigt, wie die entwickelten Modellierungsmethoden zur Gestaltung schraubgefräster Bauteile in Form einer CAD-Applikation an einen Konstruktionsprozess eingebunden und genutzt werden kann. Das Umsetzungsbeispiel der konzipierten, normgerechten und fertigungsorientierten Features mit den dazugehörigen Entscheidungshilfen für den Konstrukteur wurde in Form einer eigenständigen CAD-Umgebung ebenfalls vorgestellt. Die Einbindungsmöglichkeit der quantitativen KBK-Methoden in Form normgerechter und fertigungsorientierter 3D-CAD-Modellanalysen wurde ebenfalls exemplarisch für eine Welle gezeigt.

Die angestrebte Durchgängigkeit der CAD-CAM-Prozesskette wurde durch die Verknüpfung der entsprechenden Fertigungs- und Geometrieanalysefeatures mit den konzipierten Wissensdatenbanken und einem Webservice-Dienst realisiert und dargestellt. Hierzu wurde die konzipierte Strategie zur Einbindung technologischer Fertigungsinformationen herangezogen und am Beispiel eines Wellenabsatzes evaluiert. Dabei spielte die Entwicklung einer Schnittstellendatei in JSON-Format eine wichtige Rolle zur Realisierung einer CAD-CAM-Kopplung ohne Datenbrüche. Sie enthält zusammen mit den Geometriedaten die Vorschläge für die durchzuführenden Fertigungsschritte mit den dazugehörigen Prozessparametern und bildet somit die Ausgangsbasis für weitere Prozessschritte und Tools, welche dem Konstrukteur schon in einer frühen Phase der Produktentstehung zur Zeit- und Kostenabschätzung verhelfen sollen.

Die in dieser Arbeit dargelegten Ansätze, Konzepte und Strategien, die zur Entwicklung der einzelnen CAD-Methoden sowie der vorgeschlagenen CAD-Methodik führten, besitzen eine Allgemeingültigkeit, deren Übertragbarkeit auf andere Konstellationen der CAD-CAM-Systeme überprüft werden muss. Zwecks Weiterentwicklung der CAD-Methodik sollten auch folgende Punkte betrachtet werden:

- Hinsichtlich der Geometriemodellierungsmethodik zur Abbildung der Zerspanungsvorgänge sind aufgrund der werkzeug- und lageabhängigen Geometrie der Bewegungshüllen sowie Nutzung anderer Fertigungsverfahren weitere Arbeiten zur Verallgemeinerung der Modellierungsmethodik notwendig.

- Es sollten die in der Literatur vorzufindenden methodischen Ansätze zur Integration geometrischer Produktspezifikationen (GPS) [EbLe14], [EGL14] [BeEb15] und einer CAD-integrierten Toleranzsynthese [KHF14], welche auch einen Einfluss auf die Fertigungsstrategie haben, betrachtet werden. Es fehlt nämlich eine sinnvolle Verknüpfung der Ansätze untereinander und der in dieser Arbeit vorgestellten Strategie zur Ermittlung und Einbindung technologischer Fertigungsinformationen. Durch die Verknüpfung könnten die funktionsbedingten Werte für Modell- bzw. Fertigungsparameter mit den fertigungstechnisch korrekten Werten abgeglichen werden und somit von Anfang an eine mangelhafte 3D-CAD-Modellierung verhindert werden.
- Die vorgestellte Schnittstellenfunktionalität zum Austausch von Geometrie- und dazugehörigen Fertigungsdaten im JSON-Format bietet zwar den Vorteil, dass während der CNC-Programmierung in der CAM-Umgebung ein Fertigungsschritt vergessen wird oder Fehler durch eine manuelle Eingabe der Prozessparameter verhindert werden, setzt aber das Vorhandensein entsprechender Parser voraus. Diese sind jedoch system- und programmspezifisch zu erstellen. Eine Validierung der Vorgehensweise mit verschiedenen CAM-Systemen steht noch aus und sollte in weiteren Untersuchungen angestrebt werden. Das betrifft ebenfalls die Nutzung der JSON-Datei und ihrer Anwendbarkeit auf die in verschiedenen Softwaretools implementierten quantitativen KBK-Methoden.

Schlussendlich kann gesagt werden, dass die Einbindung der CAD-Methoden in der frühen Phasen der Produktentwicklung und eine kontinuierliche und konsequente Nutzung der Methoden im Einzelnen als auch in Form der vorgeschlagenen CAD-Methodik die Produktivität in der Prozesskette Konstruktion-Fertigung strategisch gesehen steigern kann. Um dies jedoch eindeutig beweisen zu können, ist eine detaillierte Betrachtung der Wirtschaftlichkeit und Rentabilität der CAD-CAM-Prozessschritte vonnöten.

7 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Kostenfestlegung und Kostenentstehung [EKL14]	2
Abb. 2-1: Unterteilung der Fertigungsverfahren nach [DIN8589]	7
Abb. 2-2: Basisgrößen der Zerspantechnik nach [Aw07], [Sa11a] und [DIN6580]	8
Abb. 2-3: Unterteilung der Drehverfahren nach [WiDü06]	9
Abb. 2-4: Verfahrensvarianten zur Erzeugung runder Flächen nach [DIN8589]	10
Abb. 2-5: Unterteilung der Fräsverfahren nach [WiDü06]	11
Abb. 2-6: CNC-Drehfräsen einer Nockenwelle	12
Abb. 2-7: CNC-Drehfräsen Wendelnut	12
Abb. 2-8: Unterteilung der Bohrverfahren [WiDü06]	13
Abb. 2-9: Stoßrichtungen zum Kostensenken im Unternehmen [EhMe13]	15
Abb. 2-10: Einflussgrößen auf die Herstellkosten [VDI2235] und [EhMe13]	15
Abb. 2-11: Kostenanalyse während der Konstruktion [EhMe13]	16
Abb. 2-12: Maßnahmen zur Reduzierung der Herstellkosten [Fi08]	17
Abb. 2-13: Systematisierung der KBK-Methoden nach [Mö03], [Mö11] und [Hi11]	18
Abb. 2-14: Konstruktionsphasen und konstruktive Kosteneinflussgrößen[EhMe13] und [Fi08]	20
Abb. 2-15: Motivation und Nutzung von Normen und Standards [HKM09]	21
Abb. 2-16: Regelkreise in Verbindung von Normen und Standards [HKM09]	21
Abb. 2-17: Produktivität, Effizienz und Effektivität nach [De94]	24
Abb. 2-18: Veränderungen der methodischen Produktentstehungsmethoden [EiSt09]	26
Abb. 2-19: Wissenstreppe nach North [No11]	28
Abb. 2-20: Definition des Begriffes Wissen nach [Mi07]	28
Abb. 2-21: Prozessbezogene Betrachtung der Daten, Informationen und des Wissens [Ko14]	28
Abb. 2-22: Unternehmenswissen	29
Abb. 2-23: SysLM als Mittel zur Beherrschung der Komplexität der IT-Welt ([Pa16], [Ei16], [Se16])	30
Abb. 2-24: Einsatzgebiete von CAx-Systemen [He11]	31
Abb. 2-25: 3D-Produktmodellierung in verschiedenen Phasen des Produktlebenszyklus [VDI2209]	32
Abb. 2-26: Bausteine der KBE-Technologie nach [LiSt04]	34
Abb. 2-27: Integration von KBE- in CAD-Systeme nach [Lu09]	34
Abb. 2-28: Grundlegender Aufbau und Bestandteile eines Features [He11]	35
Abb. 2-29: Farbtabelle für Feature-Mapping	38

Abb. 2-30: Softwaretools zur Überprüfung 3D-CAD-Modelle.....	39
Abb. 2-31: CAD/NC-Kopplungsvarianten [He11]	43
Abb. 2-32: Verschachtelung in XML-Datei	49
Abb. 2-33: Werte in einer JSON-Datei [JS15]	50
Abb. 2-34: Aufbau eines Datenbanksystems [Lu09]	50
Abb. 2-35: Relation in Tabellendarstellung [Lu09].....	51
Abb. 2-36: Komponenten von MySQL [My16].....	53
Abb. 2-37: SOA Tempel [Me10]	54
Abb. 2-38: SOA Dreieck [Me10].....	54
Abb. 2-39: Webservice	55
Abb. 3-1: Wissenstransformation, -formalisierung und -transfer	57
Abb. 3-2: KBE und Wissenstransformation, Wissensformalisierung und Wissenstransfer	58
Abb. 3-3: Bauteilspektrum mit konventionellen Fertigungsverfahren zu ihrer Herstellung.....	58
Abb. 3-4: Flankenformen von Zylinderschnecken [LM15]	59
Abb. 3-5: Wendelverteilerwerkzeug nach [Wo14].....	60
Abb. 3-6: Geometrieparameter eines Wendelverteilers nach [Cr08] (links) und [He15] (rechts).....	61
Abb. 3-7: Vergleich des CAD-Feature Geometrie mit der Zerspanungsgeometrie.....	63
Abb. 3-8: Zylinderschnecken und ihre Herstellungsverfahren	64
Abb. 3-9: Abweichungen beim Fräsen von ZA- und ZN-Schnecken	65
Abb. 3-10: ZK-Schnecke	66
Abb. 3-11: Entwicklungs- und Konstruktionsprozess eines Wendelverteilers.....	67
Abb. 3-12: Problematik der zerspanungsgerechten Geometrieabbildung.....	67
Abb. 3-13: Bewegungshülle	69
Abb. 3-14: Bohrungsfeature im CAD-System Creo 2.0.....	70
Abb. 3-15: Hierarchical manufacturing feature structure [HHP13]	71
Abb. 3-16: Fehlerhaftes Wellenmodellbeispiel.....	73
Abb. 3-17: Wellenmodell: Bohrvorgang	73
Abb. 3-18: Wellenmodell: Fräsvorgang.....	74
Abb. 3-19: Wellenmodell: Einstechvorgang.....	74
Abb. 3-20: Programmablaufplan bei ModelCHECK.....	75
Abb. 3-21: ModelCHECK Prüfungen eines 3D-Getriebewellenmodells	76
Abb. 3-22: Umrechnung für ModelCHECK-Prüfung „SHORT_EDGES“	77
Abb. 3-23: Struktur des DFMPPro-Tools.....	78

Abb. 3-24: Programmablaufplan bei DFMPPro	78
Abb. 3-25: DFMPPro-Prüfungen für ein 3D-Modell einer Getriebewelle	79
Abb. 3-26: DFMPPro-Lösungsansatz zur Analyse der Einstichgeometrie	80
Abb. 3-27: DFMPPro-Lösungsansatz zur Analyse der möglichen Spannstelle	81
Abb. 3-28: Strategie zur Kopplung der KBK-Verfahren an den virtuellen Konstruktionsprozess.....	82
Abb. 4-1: Abbildung der Werkzeugbewegungshüllen	85
Abb. 4-2: Analytischer Ansatz zur Berechnung der Werkzeugverfahrwege.....	86
Abb. 4-3: Schaftfräser in kegeliger und zylindrischer Ausführung [PHL08].....	87
Abb. 4-4: Aufbau von Werkzeugmodellen nach [DIN4000-82]	87
Abb. 4-5: Tangentialbedingung.....	88
Abb. 4-6: Senkrechtensteuerung.....	88
Abb. 4-7: Versatz (YZ)	89
Abb. 4-8: Versatz (XY)	89
Abb. 4-9: Schnittkurven.....	90
Abb. 4-10: Kegeliges Werkzeug (YZ)	90
Abb.: 4-11: Parameter am konischen Schaftfräser.....	91
Abb. 4-12: Werkzeugneigung (YZ).....	91
Abb. 4-13: Virtuelle Werkzeugmaschine.....	93
Abb. 4-14: Gitterstruktur zur Gestaltung der seitlichen Berandungsflächen	93
Abb. 4-15: Bodenfläche eines konischen Schaftfräasers.....	94
Abb. 4-16: Flächenanteile in Abhängigkeit vom Gangwinkel.....	94
Abb. 4-17: Vergleich zwischen 2- und 3-dimensionalem Werkzeugeingriff.....	95
Abb. 4-18: Eingriffskurven.....	95
Abb. 4-19: Kontur im Achsschnitt.....	95
Abb. 4-20: Flächenanteile in Abhängigkeit vom Gangwinkel.....	96
Abb. 4-21: Kreisflächenanteil.....	96
Abb. 4-22: Werkzeugabschlussflächen	97
Abb. 4-23: Einfluss der Kurvenanzahl.....	98
Abb. 4-24: Liste der voneinander abhängigen Features.....	99
Abb. 4-25: Ebenen der Prozessdatenblätter	100
Abb. 4-26: Aufbau eines Übersichtsblattes	100
Abb. 4-27: Beispiel für den Entscheidungsraum	100
Abb. 4-28: Entscheidungshilfe für Zentrierbohrung	101

Abb. 4-29: Zusammenspiel aus Methodik und Fertigungsfeature.....	102
Abb. 4-30: Methodik der geometrischen Bezüge für Toleranzen	103
Abb. 4-31: Erweiterung der Featuresemantik	104
Abb. 4-32: Zentrierbohrung als Geometrie-Feature mit Fertigungsinformationen.....	104
Abb. 4-33: Tendenzielle Zuordnung zum Fertigungsverfahren [Sz93] und [FHN05]	106
Abb. 4-34: Reihenfolge der benötigten Bearbeitungsschritte	106
Abb. 4-35: Zusammenhänge zwischen dem Bearbeitungswerkzeug und den Prozessparametern nach [Sa14a].....	107
Abb. 4-36: Bezugspunkte, Achsen bei einer Drehmaschine	107
Abb. 4-37: Konzept der Wissenskopplung.....	108
Abb. 4-38: Anbindung der Fertigungsinformationen an die CAD-Geometrie	109
Abb. 4-39: Verknüpfung der fertigungsrelevanten Informationen	110
Abb. 4-40: Strategie der Wissensauswertung	111
Abb. 4-41: Funktion zur Ermittlung eines Absatzes mit größtem Durchmesser	112
Abb. 4-42: Funktionen zur Ermittlung der Flächenform und -größe	112
Abb. 4-43: Prüfung der Durchmesserdivergenz zur Ermittlung der Flächenform.....	113
Abb. 4-44: Beispiel für eine zerspanungsgerechte Geometrieanalyse.....	114
Abb. 5-1: Vorgehensmodell.....	115
Abb. 5-2: CAD-Applikation zur Gestaltung zerspanungsorientierter Geometrie	117
Abb. 5-3: Abbildung der Modellierungsmethodik in der CAD-Applikation	117
Abb. 5-4: CAD-Umgebung in Creo 2.0 mit integrierten fertigungsorientierten Features	118
Abb. 5-5: Fertigungsgerechte Geometrieanalyse	120
Abb. 5-6: Webservice zur Einbindung technologischer Fertigungsinformationen	120
Abb. 5-7: Schnittstellendatei im JSON-Format.....	121
Abb. 5-8: Featurebasierte Informationsübergabe	122
Abb. 5-9: Einbindung von Fertigungsinformationen.....	122
Abb. 5-10: Datenstruktur des CAD-Templates.....	123

8 Literaturverzeichnis

- [AaNy95] Aamodt, A.; Nygård, M.: Different roles and mutual dependencies of data, information, and knowledge — An AI perspective on their integration. In *Data & Knowledge Engineering*, 1995, 16; S. 191–222.
- [Ad12] Adams, R.: *SQL. Eine Einführung mit vertiefenden Exkursen*. Hanser, München, 2012.
- [ADM12] Albers, A.; Denkena, B.; Matthiesen, S.: *Faszination Konstruktion. Berufsbild und Tätigkeitsfeld im Wandel*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [AES12] Anderl, R. et al.: *Smart Engineering. Interdisziplinäre Produktentstehung*. Springer, Berlin [u.a.], 2012.
- [Am04] Amelingmeyer, J.: *Wissensmanagement. Analyse und Gestaltung der Wissensbasis von Unternehmen*. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 2004.
- [An93] Anderl, R.: *CAD-Schnittstellen. Methoden und Werkzeuge zur CA-Integration*. Carl Hanser Fachbuchverlag, München, 1993.
- [AnTr00] Anderl, R.; Trippner, D. Hrsg.: *STEP Standard for the Exchange of Product Model Data. Eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303 (STEP)*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2000.
- [Ar09] Aras, E.: Generating cutter swept envelopes in five-axis milling by two-parameter families of spheres. In *Computer-Aided Design*, 2009, 2009; S. 95–105.
- [ArKe11] Arndt, I.; Kergaßner, R.: *Innovative Geschäftsmodelle durch SOA. Serviceorientierte Architekturen: IT-Outsourcing in der Praxis Strategien, Projektmanagement, Wirtschaftlichkeit*. Schmidt, Berlin, 2011; S. 229–238.
- [ASMY14.41] American Society of Mechanical Engineers: *Digital product definition data practices. Engineering drawing and related documentation practices*. The American Society of Mechanical Engineers, New York.
- [Au15] Autodesk Inc.: *Simulation DFM*.
<http://usa.autodesk.com/adsk/servlet/pc/index?id=19335884&siteID=123112>, 02.01.2015.
- [Aw07] Awiszus, B. Hrsg.: *Grundlagen der Fertigungstechnik. Mit 55 Tabellen*. Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl., München, 2007.
- [Bä84] Bär, G.: *Grundlagen der rechnergestützten Konstruktion und Fertigung von Schraubflächen*. TU, Diss.--Dresden, 1984. Techn. Univ, Dresden, 1984.
- [BBK08] Brökel, K. et al.: *Pro/ENGINEER. Effektive Produktentwicklung*. Pearson Studium, München, 2008.
- [BeEb15] Berndt, K.; Ebermann, M.: *Methodik zur funktionsorientierten Tolerierung mittels CAD-basierter Analysen*. In (Berger, M. Hrsg.): *Saxsim - 7. Saxon Simulation Meeting. Präsentationen und Vorträge des 7. Anwendertreffens am 31. März 2015 an der Technischen Universität Chemnitz*. Universitätsverlag Chemnitz, Chemnitz, 2015.
- [BeMü99] Beisheim, N.; Müller, N.: *Die Anwendung der Feature-Technologie im Konstruktions-Informationssystem*. In (Dietz Hrsg.): *Mitteilungen aus dem Institut für*

- Maschinenwesen der Technischen Universität Clausthal. IMW, TU Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, 1999; S. 53–58.
- [Bo15] Boothroyd Dewhurst Inc.: DFMA. <https://www.dfma.com/>, 20.08.2015.
- [BrAp91] Brauer, W.; Appelrath, H.J. Hrsg.: Datenbanksysteme in Büro, Technik und Wissenschaft. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1991.
- [Bu07] Burbiel, H.: SOA & Webservices in der Praxis. [Service Oriented Architecture mit XML, SOAP, NET, Java & Co.]. Franzis, Poing, 2007.
- [ChCa08] Chen, Z. C.; Cai, W.: An Efficient, Accurate Approach to Representing Cutter-Swept Envelopes and Its Applications to Three-Axis Virtual Milling of Sculptured Surfaces. In Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2008, 130; S. 31004.
- [Co13] Conrad, K.-J.: Grundlagen der Konstruktionslehre. Methoden und Beispiele für den Maschinenbau und die Gerontik. Hanser, München, 2013.
- [Co91] Codd, E. F.: The relational model for database management. Version 2. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1991.
- [Cr08] Cretu, I. M.: Analyse, Auslegung und Optimierung von Wendelverteilersystemen. Dissertation, Stuttgart, 2008.
- [DaKö06] Danjou, S.; Köhler Peter: Herausforderungen an das Konstruktionsmanagement. In Springer-VDI Konstruktion, 2006; S. 78.
- [DaSe14] Darmawikarta, D.; Setiadi, M.: SQL for MySQL. A beginner's tutorial. Brainy Software, Montréal, Québec, 2014.
- [De08] Dean, A.: DFMPRO Offers Streamlined Process. <http://www.deskeng.com/de/dfmpro-offers-a-streamlined-process/>, 22.01.2015.
- [De94] Dellmann, K. Hrsg.: Controlling von Produktivität, Wirtschaftlichkeit und Ergebnis. Schäffer-Poeschel, Stuttgart, 1994.
- [DIN332-1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Zentrierbohrungen 60° Form R, A, B und C. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1986.
- [DIN332-2] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Zentrierbohrungen 60° mit Gewinde für Wellenenden elektrischer Maschinen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1983.
- [DIN332-7] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Werkzeugmaschinen Zentrierbohrungen 60° Bestimmungsverfahren. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1982.
- [DIN332-8] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Zentrierbohrungen 90° Form S Maße Bestimmungsverfahren. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1979.
- [DIN333] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Zentrierbohrer 60° Form R, A und B. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1986.
- [DIN3975-1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Begriffe und Bestimmgrößen für Zylinder-Schneckengetriebe mit sich rechtwinklig kreuzenden Achsen, 2012.
- [DIN4000-82] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Sachmerkmal-Listen - Teil 82: Fäser mit Schaft und nicht lösbaren Schneiden. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011.
- [DIN44300] Deutsche Norm: Informationsverarbeitung, 1988.

- [DIN45020] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Normung und damit zusammenhängende Tätigkeiten - Allgemeine Begriffe (ISO/IEC Guide 2:2004); Dreisprachige Fassung EN 45020:2006.
- [DIN471] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Sicherungsringe (Halteringe) für Wellen – Regelausführung und schwere Ausführung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2011.
- [DIN509] DIN: Technische Zeichnungen – Freistiche – Formen, Maße, 2006.
- [DIN6580] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Begriffe der Zerspantechnik. Bewegungen und Geometrie des Zerspanvorganges., 1985.
- [DIN66025-1] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen, 1983.
- [DIN66025-2] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen, 1988.
- [DIN6885] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Passfedern Nuten, hohe Form. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1968.
- [DIN8580] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Fertigungsverfahren Begriffe, Einteilung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.
- [DIN8589] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: Fertigungsverfahren Spanen. Beuth Verlag GmbH, 2003.
- [Du14] DuBois, P.: MySQL cookbook. O'Reilly, Sebastopol, Calif, 2014.
- [Dy02] Dyla, A.: Modell einer durchgängig rechnerbasierten Produktentwicklung, 2002.
- [EbLe14] Ebermann, M.; Leidich, E.: Integration der geometrischen Produktspezifikation (GPS) in den methodischen Konstruktionsprozess am Beispiel eines Prüfstandes. In (Brökel, K. et al. Hrsg.): Methoden in der Produktentwicklung: Kopplung von Strategien und Werkzeugen im Produktentwicklungsprozess. 12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik; KT2014, Bayreuth, 2014; S. 247–262.
- [EGL14] Ebermann, M.; Gröger, S.; Leidich, E.: Integration der GPS in den methodischen Konstruktionsprozess nach VDI 2221. In (Stelzer, R. Hrsg.): Entwerfen Entwickeln Erleben 2014, 2014; S. 383–396.
- [EGZ13] Eigner, M.; Gilz, T.; Zafirov, R.: Interdisziplinäre Produktentwicklung. Modellbasiertes Systems Engineering, 2013.
- [EhMe13] Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.: Integrierte Produktentwicklung. Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. Hanser, München, 2013.
- [Ei13] Eigner, M.: Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung auf einer Plattform für System Lifecycle Management. In (Sandler, U. Hrsg.): Industrie 4.0. Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysML. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [Ei16] Eigner, M. <https://vpe.mv.uni-kl.de/lehrstuhl/lehrstuhlinhaber/>, 11.02.2016.
- [EiSt09] Eigner, M.; Stelzer, R. Hrsg.: Product-Lifecycle-Management. Ein Leitfaden für product development und Life-Cycle-Management. Springer, Berlin [u.a.], 2009.

- [EKL14] Ehrlenspiel, K. et al.: Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [Er08] Erlenkötter, H.: XML. Extensible Markup Language von Anfang an. Rowohlt-Taschenbuch-Verl., Reinbek bei Hamburg, 2008.
- [ERZ14] Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R. Hrsg.: Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- [FeGr13] Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [FHN05] Fischer, U. et al.: Tabellenbuch Metall. Verl. Europa-Lehrmittel, Haan-Gruiten, 2005.
- [Fi08] Fischer, J. O.: Kostenbewusstes Konstruieren. Praxisbewährte Methoden und Informationssysteme für den Konstruktionsprozess. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [FLL11] Friedewald, A. et al.: Benchmark neutraler Formate für den prozessübergreifenden Datenaustausch im Schiffbau, 2011.
- [Fr07] Franz, R.U. Hrsg.: Serviceorientierte Architekturen - von der Strategie zum Projekt. Tagungsband zum 6. Berlin-Brandenburger SAP-Forum der Fachhochschule Brandenburg am 14. Juni 2007. Shaker, Aachen, 2007.
- [Fr12] Frost, J.: Wissensmanagement.
<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55427/wissensmanagement-v8.html>, 02.03.15.
- [FrSc06] Fritz, A. H.; Schulze, G.: Fertigungstechnik. Springer, Berlin [u.a.], 2006.
- [Ga06] Gausemeier, J.: Vernetzte Produktentwicklung. Der erfolgreiche Weg zum Global Engineering Networking. Hanser, München, 2006.
- [Ge11] Geisler, F.: Datenbanken - Grundlagen und Design. Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm, Heidelberg, 2011.
- [Ge14] Geisler, F.: Datenbanken. Grundlagen und Design. Verlagsgruppe Hüthig Jehle Rehm, s.l., 2014.
- [Ge15] Geometric Ltd.: DFMPPro. <http://dfmpro.geometricglobal.com>, 20.05.2015.
- [GEB14] Grote, K.-H. et al.: Das Ingenieurwissen: Entwicklung, Konstruktion und Produktion. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [GNK05] Gössner, S. et al.: Validierung von XML – Dokumenten, 2005.
- [Go14] Godrej, J. N.: DFMPPro. Dokumentation. Geometric, 2014.
- [Ha10] Hack, S.: Geschäftsprozessmanagement und Service-Orientierte Architekturen (SOA). Erfahrungen beim Aufbau von Geschäftsprozessplattformen - Projektbeispiele und Vorgehen: transformIT optimale Geschäftsprozesse durch eine transformierende IT. Gabler, Wiesbaden, 2010; S. 127–156.
- [He11] Hehenberger, P.: Computerunterstützte Fertigung. Eine kompakte Einführung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin [u.a.], 2011.

- [He15] Heesen, O. T.: Ganzheitlicher Ansatz zur Dimensionierung und Optimierung von Extrusionswerkzeugen am Beispiel von Wendelverteiltern. Holistic approach for dimensioning and optimization of extrusion dies, 2015.
- [HeSt10] Heubel, A.; Stollsteimer, P.: Wirksames Produktivitätsmanagement geht über das Senken von Kosten hinaus, 2010.
- [HHP13] Hoque et al.: Integrated manufacturing features and Design-for-manufacture guidelines for reducing product cost under CAD/CAM environment. In Computers & Industrial Engineering, 2013, 66; S. 988–1003.
- [HHW13] Heesen, te Oliver et al. Hrsg.: CFD based design of extrusion dies under manufacturing and process technology aspects. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Przemysłu Chemicznego Zakład Poligraficzno-Wydawniczy w Gliwicach, Sosnowiec, Poland, 2013.
- [Hi11] Hilleke, C.: Kosteneinsparungen durch fertigungsoptimale Konstruktion (mithilfe der konstruktionsbegleitenden Kalkulation). In (Lingohr, T.; Kruschel, M. Hrsg.): Best Practices im Value Management. Gabler, 2011; S. 211–234.
- [HKM09] Hartlieb, B.; Kiehl, P.; Müller, N.: Normung und Standardisierung. Grundlagen. Beuth Verlag GmbH, s.l., 2009.
- [HLH92] Hoschek, J.; Lasser, D.; Hoschek-Lasser: Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung. Teubner, Stuttgart, 1992.
- [HMS13] Hartlieb, B.; Müller, N.; Schröder, B.: Normung für Kleinunternehmen aus Industrie und Handwerk. Beuth Verlag GmbH, s.l., 2013.
- [Ho01] Hoffmann, R.: Integration höherwertiger Feature-Elemente in den rechnergestützten Konstruktionsprozeß. VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 20, Rechnerunterstützte Verfahren, Nr. 344, 2001.
- [Ho14] Hofstadler, C.: Produktivität im Baubetrieb. Bauablaufstörungen und Produktivitätsverluste. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [Ho16] Hoffman Group: GARANT ToolScout. Zerspanungshandbuch, 2016.
- [HoMe10] Hoenow, G.; Meissner, T.: Entwerfen und Gestalten im Maschinenbau. Bauteile - Baugruppen - Maschinen. Carl-Hanser, München, 2010.
- [HoMe12] Hoenow, G.; Meißner, T.: Konstruktionspraxis im Maschinenbau. Vom Einzelteil zum Maschinendesign. Carl-Hanser, München, 2012.
- [HWH15] Heesen te, O. et al.: Automatic Optimization of Spiral Mandrel Dies by a Coupled Approach Using the Methods of Flow Analysis Networks and Three Dimensional CFD-Simulations. In Proceedings of Polymer Processing Society 31th (PPS-31), 2015, 2015.
- [ISO14649-X] International Organization for Standardization: Data model for computerized numerical controllers.
- [ISO9075:2011] ISO/IEC: Information technology -- Database languages -- SQL, 2011.
- [ISO9075-14:2011] ISO/IEC: Information technology -- Database languages -- SQL -- Part 14: XML-Related Specifications (SQL/XML), 2011.
- [Jä08] Jäger, K.: Ajax in der Praxis. Grundlagen, Konzepte, Lösungen. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.

- [Ja16] Jackson, C.: Das Versprechen von PMI: Optimierung von Entwicklungsunterlagen. [https://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/nx/for-design/drafting-documentation/product-manufacturing-information.shtml#lightview%26url=/de_de/Images/promise_of_pmi_tcm73-209190.pdf%26title=Lifecycle Insights: Das Versprechen von PMI eBook%26description=%26docType=pdf](https://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/nx/for-design/drafting-documentation/product-manufacturing-information.shtml#lightview%26url=/de_de/Images/promise_of_pmi_tcm73-209190.pdf%26title=Lifecycle%20Insights%20Das%20Versprechen%20von%20PMI%20eBook%26description=%26docType=pdf).
- [Jä91] Jäger, K.-W. Hrsg.: Schnittstellen bei CAD-, CAE-Systemen. Grundlagen, Anwendungsbeispiele, Problematik, Lösungsansätze. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991.
- [JS15] JSON: Einführung in JSON. <http://json.org/json-de.html>, 23.5.2015.
- [Ju02] Jung, S.: Erarbeitung eines wissensbasierten Systems für die Modellierung von Mehrkomponenten-Mehrphasen-Gleichgewichten. Dissertation, Halle, 2002.
- [Jü91] Jürgen Rothley: Fertigungsgerechtes Konstruieren auf der Basis von technischen Formelementen gezeigt am Beispiel der spanenden Fertigung. Dissertation, 1991.
- [KBS07] Krafzig, D.; Banke, K.; Slama, D.: Enterprise SOA. Wege und Best Practices für serviceorientierte Architekturen. mitp, Heidelberg, 2007.
- [Ke14] Kesselmanns, C.: Höherwertige Konstruktionsobjekte für CAD-Prozesse. Cuvillier, Göttingen, 2014.
- [KeEi15] Kemper, A.; Eickler, A.: Datenbanksysteme. Eine Einführung. De Gruyter Oldenbourg, Berlin, 2015.
- [KHF14] Katzwinkel, T.; Heller, J. E.; Feldhusen, J.: Ein Ansatz zur methodischen, CAD integrierten Toleranzsynthese. In (Stelzer, R. Hrsg.): Entwerfen Entwickeln Erleben 2014, 2014; S. 433–449.
- [KHK11] Klemme, U.; Humpa, M.; Köhler, P.: Effizienzsteigerung des virtuellen Produktentwicklungsprozesses durch automatisierte Modellierungsansätze im Optimierungsumfeld. In (Brökel, K. et al. Hrsg.): Integrierte Produktentwicklung für einen globalen Markt. Tagungsband ; 9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2011 ; am 06. und 07. Oktober 2011 in Rostock ; [KT 2011]. Shaker, Aachen, 2011; S. 90–97.
- [Ki90] Kirsch, W.: Unternehmenspolitik und strategische Unternehmensführung. Kirsch, Herrsching, 1990.
- [KiRo15] Kief, H. B.; Roschiwal, H. A.: CNC-Handbuch 2015/2016. CNC DNC CAD CAM FFS SPS RPD LAN CNC-Maschinen CNC-Roboter Antriebe Energieeffizienz Werkzeuge Simulation Fachwortverzeichnis. Hanser, München, 2015.
- [Kl01] Klein, O.: Datenbanken und XML, 2001.
- [KlKö08] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren. Drehen, Fräsen, Bohren. Springer, Berlin [u.a.], 2008.
- [KlRa05] Kleinschmidt, P.; Rank, C.: Relationale Datenbanksysteme. Eine praktische Einführung ; mit zahlreichen Beispielen und Übungsaufgaben. Springer, Berlin [u.a.], 2005.
- [Ko14] Kohn, A.: Entwicklung einer Wissensbasis für die Arbeit mit Produktmodellen. Verl. Dr. Hut, München, 2014.
- [Kö14] Köhler, P. Prof. Dr.-Ing.: Produktentwurf. Skript Vorlesung, Duisburg, 2014.

- [KoLe04] Kossmann, D.; Leymann, F.: Web Services. In Informatik-Spektrum, 2004, 27; S. 117–128.
- [KPP12] Kalweit, A. et al.: Handbuch für Technisches Produktdesign. Material und Fertigung, Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure. Springer, Berlin [u.a.], 2012.
- [Kr08] Krammer, A.: Serviceorientierte Architekturen und semantische Technologien zur Flexibilisierung von Prozessen. Sierke, Göttingen, 2008.
- [Kr15] Krcmar, H.: Informationsmanagement. Springer Gabler, Wiesbaden, 2015.
- [KrSt14] Krahn, H.; Storz, M.: Konstruktionsleitfaden Fertigungstechnik. Anwendungsbeispiele aus der Praxis. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014.
- [Le06] Lee, S. W.: Beitrag zur Generierung der Hüllvolumina für die NC-Fertigung mittels Gaußabbildung. Forschungsbericht, Dresden, 2006.
- [Le09] Lee, S. W.: Simultan 5-Achs-Frässimulation zur Verifikation der Werkzeugbahn. Forschungsbericht, Dresden, 2009.
- [Le14a] Lehner, F.: Wissensmanagement. Grundlagen, Methoden und technische Unterstützung. Hanser, München, 2014a.
- [Le14b] Leimeister, J. M.: Collaboration Engineering. IT-gestützte Zusammenarbeitsprozesse systematisch entwickeln und durchführen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014b.
- [LeCh06] Lee, S. Y.; Chiou, J. C. J.: Swept Tool Envelope and Machining Potential Field for 5-Axis Sculptured Surface Machining. In Computer-Aided Design and Applications, 2006; S. 751–760.
- [LHC08] Lee, N. J.; Huang, C. B.; Chen, T. C.: Toolpath generation method for four-axis NC machining of helical rotor. In Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2008.
- [LiSt04] Liese, H.; Stjepandic, J.: KBE-Methodik: Wissensbasierte 3D-CAD Modellierung. In CAD CAM Report, 2004.
- [LiZh14] Li, Z.-L.; Zhu, L.-M.: Envelope Surface Modeling and Tool Path Optimization for Five-Axis Flank Milling Considering Cutter Runout. In Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2014, 136; S. 41021.
- [LM15] LMT Tools: LMT Fette Verzahnung-Werkzeuge und Wissen, 2015.
- [Lu09] Lupa, N.: Einsatz wissensbasierter Features für die automatische Konfiguration von Produktkomponenten. Cuvillier, Göttingen, 2009.
- [Me08] Merkle, J.: Hüllflächenberechnung bei Werkzeug-Schleifbearbeitungen. Kinematik, Differentialgeometrie und CAD. VDM Verl. Dr. Müller, Saarbrücken, 2008.
- [Me10] Melzer, I.: Service-orientierte Architekturen mit Web Services. Konzepte Standards Praxis. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 2010.
- [Me91] Mehlhaus, U.: Die Schemabeschreibungssprache Express des STEP-Standards und Technische Datenbanksysteme — Eine Analyse —. In (Brauer, W.; Appelrath, H. J. Hrsg.): Datenbanksysteme in Büro, Technik und Wissenschaft. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1991; S. 454–461.

- [MeTi09] Meyer, J.-A.; Tirpitz, A.: Service-orientierte Architekturen (SOA) im Mittelstand. Zwischen technisch Machbarem und kaufmännisch Sinnvollem. Eul, Lohmar, 2009.
- [Mi07] Milton, N. R.: Knowledge acquisition in practice. A step-by-step guide. Springer, London, 2007.
- [Mö03] Möller, K.: Kosteninformationssystem für die Antriebstechnik: Abschlußbericht ; Forschungsvorhaben. FVA, 2003.
- [Mo07] Mourek, D.: Merachsig Programmierung der Schleifscheibebewegung beim Nutschleifen, 2007.
- [Mö11] Möller, K.: Konstruktionsbegleitende Kalkulation. http://www.controlling-wiki.com/de/index.php/Konstruktionsbegleitende_Kalkulation, 15.09.2015.
- [My16] MySQL: MySQL. <http://www.mysql.de/>, 22.02.2016.
- [Na06] Nasr, E. A.: IGES Standard Protocol for Feature Recognition CAD System. In (Kamrani, A.; Nasr, E. A. Hrsg.): Rapid Prototyping. Kluwer Academic Publishers, Boston, 2006; S. 25–62.
- [NBL07] Naunheimer, H.; Bertsche, B.; Lechner, G.: Fahrzeuggetriebe. Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [Ne99] Nestler, A. Dr.-Ing.: Erfahrungsbasierte Fertigungs- und Bearbeitungs-Feature. Forschungsbericht, 1999.
- [No11] North, K.: Wissensorientierte Unternehmensführung. Wertschöpfung durch Wissen. Gabler Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2011.
- [NPS08] Nissen, V.; Petsch, M.; Schorcht, H.: Service-orientierte Architekturen. Chancen und Herausforderungen bei der Flexibilisierung und Integration von Unternehmensprozessen. Gabler, Wiesbaden, 2008.
- [Nü00] Nüttgens, M.: Open Source - Konzept, Communities und Institutionen. Einzelne Arbeitspapiere, Saarbrücken, 2000.
- [OA06] OASIS: Reference Model for Service Oriented Architecture 1.0. Committee Specification 01. <http://docs.oasis-open.org/soa-rm/v1.0/soa-rm.html>, 22.02.2016.
- [Or16] Oracle: MySQL. <https://www.oracle.com/de/products/mysql/overview/index.html>, 22.02.2016.
- [Pa05] Pankus Team Pankus Team: Von der Arbeitsvorbereitung zum Produktivitätsmanagement. Wege zur Produktivitätssteigerung, 2005.
- [Pa07] Pahl, G.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung ; Methoden und Anwendung. Springer, Berlin [u.a.], 2007.
- [Pa09] Pastwa, A.: Serviceorientierte Architekturen (SOA) als innovatives Konzept für eine integrierte Informationsverarbeitung. RUB Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, Bochum, 2009.
- [Pa11] Papsch, A.: Wissensbasierte Fertigungsplanung für komplexe Bohrprozesse. Entwicklung eine 80/20-teilautomatisierten NC_Programmierung, Universität Duisburg-Essen, 2011.
- [Pa16] Paredis, C. <http://www.mbsec.gatech.edu/users/cparedis>.

- [PHL08] Paucksch, E. et al.: Zerspantechnik. Prozesse, Werkzeuge, Technologien. Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, Wiesbaden, 2008.
- [Pi11] Piepmeyer, L.: Grundkurs Datenbanksysteme. Von den Konzepten bis zur Anwendungsentwicklung. Hanser, München, 2011.
- [PL14] PLM-Jahrbuch 2014: PLM-Jahrbuch 2014. Der Leitfaden für den PLM-Markt, 2014.
- [Pr16] ProSTEP iViP: STEP AP 242 Maintenance, 24.04.2016.
- [PZG15] Pröll, S.; Zangerle, E.; Gassler, W.: MySQL. Das umfassende Handbuch ; [aktuell zu MySQL 5.7 ; Installation, Konfiguration, Administration, Programmierung ; Skalierung, Ausfallsicherheit und Performance-Tuning ; alle wichtigen Administrationstools, Praxistipps und umfassende Befehlsreferenz; inkl. NoSQL-Funktionen mit MySQL]. Rheinwerk, Bonn, 2015.
- [Re01] Reischl, C.: Simulation von Produktkosten in der Entwicklungsphase, 2001.
- [Ri95] Rieger, E.: Semantikorientierte Features zur kontinuierlichen Unterstützung der Produktgestaltung. Hanser, München, Berlin, 1995.
- [RiAm15] Richardson, L.; Amundsen, M.: RESTful Web APIs. O'Reilly, Beijing, Cambridge, Farnham, Köln, Sebastopol, Tokyo, 2015.
- [RiSt12] Rieg, F.; Steinhilper, R.: Handbuch Konstruktion. Hanser, München [u.a.], 2012.
- [Ro05] Rotard, M. C.: Standardisierte Auszeichnungssprachen der Computergraphik für interaktive Systeme, 2005.
- [Sa11a] Sandvik Coromant: Technisches Handbuch, 2011a.
- [Sa11b] Saul, K.: Automatisierte Auslegung von Extrusionswerkzeugen. Automatic Design of Extrusion Dies, 2011b.
- [Sa13] Sandvik Coromant: Erfolgreiche Bohrbearbeitung, 2013.
- [Sa14a] Sandvik Coromant: CoroKey®. Leichte Auswahl. Einfacher Einsatz., 2014a.
- [Sa14b] Sandra Schick: Informations- und Wissensmanagement. Bedeutung von Wissen, 2014b.
- [Sa15] Sandvik Coromant: Drehbearbeitung von verschiedenen Werkstoffen. Die App von Sandvik Coromant zur Drehbearbeitung von verschiedenen Werkstoffen. Sandvik Coromant, 2015.
- [Sc67] Schmidt, F.: Berechnung und Gestaltung von Wellen. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 1967.
- [Se09] Sendler, U.: Das PLM-Kompandium. Referenzbuch des Produkt-Lebenszyklus-Managements. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Se11] Sendler, U.: Von PDM zu PLM. Prozessoptimierung durch Integration. Hanser, München, 2011.
- [Se13a] Sendler, U. Hrsg.: Industrie 4.0. Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysML. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013a.
- [Se13b] Sendler, U.: Ganzheitliche Strategie: Systems Lifecycle Management(SysLM®), 2013b.
- [Se16] Sendler, U. <http://www.ulrichsendler.de/de/>, 11.02.2016.

- [Si16] Siemens PLM Software: Product and Manufacturing Informations (PMI).
[https://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/nx/for-design/drafting-documentation/product-manufacturing-information.shtml#lightview%26uri=tcn:73-181753%26title=Featured Video - PMI and Design Intent%26docType=.flv](https://www.plm.automation.siemens.com/de_de/products/nx/for-design/drafting-documentation/product-manufacturing-information.shtml#lightview%26uri=tcn:73-181753%26title=Featured+Video+-+PMI+and+Design+Intent%26docType=.flv).
- [Sm12] Smirnova, S.: MySQL Troubleshooting. [what to do when queries don't work]. O'Reilly, Beijing, Köln, 2012.
- [So15] SolidWorks: KingCost.
<http://www.solidworks.de/sw/products/details.htm?productID=2951>, 20.08.2015.
- [Sp02] Specht, D.: Gabler Lexikon Technologie Management. Management von Innovationen und neuen Technologien im Unternehmen. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2002.
- [SpKr97] Spur, G.; Krause, F.-L.: Das virtuelle Produkt. Management der CAD-Technik. Hanser, München [u.a.], 1997.
- [St07] Stekolschik, A.: Ein Beitrag zum ganzheitlichen Qualitätsmanagement von CAD-Modellen in der Produktentstehung. Shaker, Aachen, 2007.
- [ST16] STEP: STEP AP242 Project, 24.04.2016.
- [StTi07] Starke, G.; Tilkov, S. Hrsg.: SOA-Expertenwissen. Methoden, Konzepte und Praxis serviceorientierter Architekturen. dpunkt.Verl., Heidelberg, 2007.
- [SWD09] Spath, D.; Weisbecker, A.; Drawehn, J. Hrsg.: Serviceorientierte Architekturen. Tagungsband des Stuttgarter Softwaretechnik Forums 2009, 02. Dezember 2009. Fraunhofer Verl., Stuttgart, 2009.
- [SWK12] Saul, K. et al.: Advanced Computational Technique for the Optimization of Spiral Mandrel Dies: 70th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers 2012. (ANTEC 2012) Orlando, Florida, USA, 2-4 April 2012. Society of Petroleum Engineers, Brookfield, CT, 2012; S. 959–965.
- [Sz93] Szyminski, S.: Toleranzen und Passungen: Grundlagen und Anwendungen. Vieweg+Teubner Verlag, 1993.
- [Ti03] Tietze, O.: Strategische Positionierung in der Automobilbranche. Der Einsatz von virtueller Produktentwicklung und Wertschöpfungsnetzwerken. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 2003.
- [TuOu14] Tuosto, E.; Ouyang, C. Hrsg.: Web services and formal methods. 10th international workshop, WS-FM 2013, Beijing, China, August [28-29,] 2013 ; revised selected papers. Springer, Berlin, 2014.
- [UnMa12] Unterstein, M.; Matthiessen, G.: Relationale Datenbanken und SQL in Theorie und Praxis. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [Va09] Vajna, S.: CAx für Ingenieure. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Va14] Vajna, S.: Integrated Design Engineering. Ein interdisziplinäres Modell für die ganzheitliche Produktentwicklung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [VD15] VDMA: Maschinenbau in Zahl und Bild 2015. VDMA Volkswirtschaft und Statistik, 2015.
- [VDA4950] VDA: Vereinbarungen zum CAD/CAM-Datenaustausch, 2011.
- [VDA4955] VDA: Umfang und Qualität von CAD/CAM-Daten, 2006.

- [VDI/NCG5211-1] VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (VDI-EKV): Prüfrichtlinien und Prüfwerkstücke für hochdynamische Bearbeitungen (HSC). Fräsmaschinen und Bearbeitungszentren für 3-Achs-Bearbeitung. Beuth Verlag GmbH, 2013.
- [VDI2209] VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (VDI-EKV): 3-D-Produktmodellierung Technische und organisatorische Voraussetzungen Verfahren, Werkzeuge und Anwendungen Wirtschaftlicher Einsatz in der Praxis. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009.
- [VDI2218] VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (VDI-EKV): Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung Feature-Technologie. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.
- [VDI2235] VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (VDI-EKV): VDI 2235 - Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren. Methoden und Hilfen. Beuth Verlag GmbH, Düsseldorf, 1987.
- [VDI3206] Verein Deutscher Ingenieure: Auslegung von Drehprozessen, 1994.
- [VDI5610-1] VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (VDI-EKV): Wissensmanagement im Ingenieurwesen. Grundlagen, Konzepte, Vorgehen. VDI-Verlag GmbH, Berlin, 2009.
- [VDI5610-2] VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (VDI-EKV): Wissensmanagement im Engineering. Wissensbasierte Konstruktion, 2015.
- [Vo11] Vom Brocke, J.: Serviceorientierte Architekturen - SOA. Management und Controlling von Geschäftsprozessen. Franz Vahlen, s.l., 2011.
- [Vo13] Vonhoegen, H.: Einstieg in XML. Grundlagen, Praxis, Referenz. Galileo Press, Bonn, 2013.
- [VoHa15] Vornberger, O.; Haldenwang, N.: Relationale Datenbanksysteme. In Das Wirtschaftsstudium wisu ; Zeitschrift für Ausbildung, Prüfung, Berufseinstieg und Fortbildung, 2015, 44; S. 555–556.
- [VWS94] Vajna, S. et al.: CAD/CAM für Ingenieure. Hardware, Software, Strategien. Vieweg, Braunschweig, 1994.
- [WiAx02] Widenius, M.; Axmark, D.: MySQL. Das offizielle Handbuch. mitp, [Bonn], 2002.
- [WiDü06] Witt, G.; Dürr, H.: Taschenbuch der Fertigungstechnik. Mit zahlreichen Tabellen. Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl, München [u.a.], 2006.
- [WM]15] Wittel, H. et al.: Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2015.
- [Wo14] Wortberg, J. Prof. Dr.-Ing.: Kunststoffverarbeitung- und Maschinen 1. Skript Vorlesung, Duisburg, 2014.
- [WZ07] WZL RWTH Aachen: Automatische Feature-Erkennung als Beitrag zur Effizienzverbesserung in der CAD/CAM-Integration.
<http://www.forschungsvereinigung-programmiersprachen.de/de/projekte/Automatische-Featureerkennung.htm>.

Eigene Publikationen

- [1] Humpa, Marcin; Köhler, Peter: **CAD-Methoden zur Produktivitätssteigerung in der Prozesskette Konstruktion-Fertigung**. In: 13. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2015 in Clausthal Produktentwicklung zur Qualitätssicherung / Brökel, Klaus; Feldhusen, Jörg; Grote (Hrsg.), Karl-Heinrich; Rieg, Frank; Stelzer, Ralph; Shaker Verlag Herzogenrath (2015) S. 89-102; ISBN: 978-3-944722-30-6
- [2] Manoharan, Thivakar; Humpa, Marcin; Martha, Alexander; Köhler, Peter: **Knowledge Integration in CAD-CAM Process Chain**. In International CAD Conference and Exhibition 2015 in London; S. 449–454.
- [3] te Heesen, Oliver; Wortberg, Johannes; Humpa, Marcin; Hungenberg, Phil; Köhler, Peter: **Automatic Optimization of Spiral Mandrel Dies by a Coupled Approach Using the Methods of Flow Analyse Networks and Three Dimensional CFD-Simulations**. Proceedings of Polymer Processing Society 31th (PPS-31), Jeju Island, Korea, 07.06-11.06.2015
- [4] Humpa, Marcin; Köhler, Peter: **Design Approach for Spiral Milling Parts Using Knowledge Based Engineering**. In: 27th International Conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future 2014; London, UK IOP Publishing (2014) S. 1-8; Online Volltext: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/65/1/012001>
- [5] Humpa, Marcin; Köhler, Peter: **Effizienzsteigerung des Produktentwicklungsprozesses durch fertigungsgerechte CAD-Methoden**. In: 12. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2014 : Methoden in der Produktentwicklung: Kopplung von Strategien und Werkzeugen im Produktentwicklungsprozess / Brökel, Klaus; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich; Rieg, Frank; Stelzer, Ralph (Hrsg.); Bayreuth (2014) S. 263-273; ISBN: 978-3-00-046544-4
- [6] Humpa, Marcin; Köhler, Peter: **Ein Modellierungsansatz zur funktions- und fertigungsgerechten Gestaltung schraubgefräster Bauteile**. In: 11. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik: Standortvorteil Methodik / Brökel, Klaus; Feldhusen, Jörg; Grote, Karl-Heinrich; Rieg, Frank; Stelzer, Ralph (Hrsg.); Shaker Verlag Aachen (2013) S. 219-228; ISBN: 978-3-8440-2182-0
- [7] te Heesen, Oliver; Humpa, Marcin; Wortberg, Johannes; Köhler, Peter: **CFD based design of extrusion dies under manufacturing and process technology aspects**. In: 10th International Scientific-Technical Conference Advances in Plastics Technology (APT'13) (2013) S. 565–571; ISBN: 978-83-63555-23-8
- [8] Saul, Kenny; Wortberg, Johannes; Köhler, Peter; Klemme, Uwe; Humpa, Marcin: **Advanced Computational Technique for the Optimization of Spiral Mandrel Dies**. In: 70th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers 2012 (ANTEC 2012), Orlando (2012); ISBN: 9781622760831
- [9] Humpa, Marcin; Köhler, Peter: **Beitrag zur Gestaltung fertigungsgerechter 3D-Modelle anhand der räumlichen Ausprägung spanender Fertigungsvorgänge**. In: 15. Anwendungsbezogenen Workshops zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten (3D-NordOst 2012) / Paul, Lothar; Stanke, Gerd; Heuwold, Niels (Hrsg.) Berlin Gesellschaft z. Förderung angewandter Informatik (2012) 167-175; ISBN: 978-3-942709-07-1

- [10] Humpa, Marcin; Köhler, Peter: ***Geometrische Umsetzung von Designabsichten bei der Produktmodellierung.*** In: Entwerfen Entwickeln Erleben : Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung ; 10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2012; Stelzer, Ralph; Grote, Karl-Heinrich; Brökel, Klaus; Rieg, Frank; Feldhusen, Jörg (Hrsg.) Dresden TUDpress Verlag der Wissenschaften (2012)S. 591-608; ISBN: 978-3-942710-80-0
- [11] Klemme, Uwe; Humpa, Marcin; Köhler, Peter: ***Effizienzsteigerung des virtuellen Produktentwicklungsprozesses durch automatisierte Modellierungsansätze im Optimierungsumfeld.*** In: Integrierte Produktentwicklung für einen globalen Markt : Tagungsband ; 9. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2011 ; am 06. und 07. Oktober 2011 in Rostock; Aachen : Shaker Verlag GmbH (2011) S. 90 – 97; ISBN: 978-3-8440-0381-9
- [12] Klemme, Uwe; Humpa, Marcin; Köhler, Peter: ***Das virtuelle Produktmodell als Informationsträger im numerischen Optimierungsumfeld.*** In: Produktdaten-Journal : Anwendungen, Produkte, Standards in der Produktdatentechnologie Jg. 18 (2011) ; Nr. 1, S. 36-40, ISSN: 1436-0403
- [13] Köhler, Peter; Humpa, Marcin; Kesselmanns, Christoph: ***Die Visual Basic Programmierschnittstelle - eine experimentelle Untersuchung der Möglichkeiten.*** In: PlanetPTC Live: 17.–18.11.2010, Stuttgart (2010); Online Volltext: https://www.uni-due.de/cae/mitarbeiter_humpa.php
- [14] Köhler, Peter; Danjou, Stéphane; Humpa, Marcin: ***Generierung von Bauteilgeometrien mit besonderen Krümmungs- und Kurveneigenschaften.*** In: 3D-NordOst 2009 : Tagungsband des 12. Anwendungsbezogenen Workshops zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten / Paul, Lothar (Hrsg.), Berlin Gesellschaft z. Förderung angewandter Informatik (2009) S. 167 – 175; ISBN: 978-3-9812158-7-8

Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten.